www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

14e JAARGANG No. 3, blz. 65-92 MAART 1952

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

ELECTRONISCHE VERSTERKING VAN RÖNTGENBEELDEN

door M. C. TEVES en T. TOL. 621.386.8:616-073.75:621.383.8

Het opwekken van röntgenstralen, waarbij een bundel electronen in een geëvacueerde buis te pas komt, is feitelijk al „electronica". Het is opmerkelijk dat men in de röntgendiagnostiek thans ook voor de volgende stap, het omzetten in een zichtbaar beeld van de röntgenstralen die het te onderzoeken object hebben doorlopen, van electronische hulpmiddelen gebruik gaat maken. Daarbij komt aan het licht, hoe het aantal röntgenfotonen in feite een grens stelt aan de gedetailleerdheid van de informatie die men uit een doorlichtingsbeeld kan verkrijgen.

Het probleem van de schermhelderheid bij het doorlichten

Röntgenstralen zijn in staat lichaamsweefsels te doden of te beschadigen. In de röntgentherapie maakt men hiervan een nuttig gebruik, door zieke weefsels zo lang en intensief te bestralen, totdat zij in totaal een bepaalde grote dosis röntgenstraling hebben ontvangen. In de röntgendiagnostiek moet men omgekeerd er voor waken dat de dosis die een patient tijdens een onderzoek toegediend krijgt, zo gering blijft dat hij er, ook bij herhaalde onderzoekingen, geen schadelijke gevolgen van ondervindt.

Het gevolg hiervan is, dat de arts bij de klassieke methode van het doorlichten genoegen moet nemen met een zeer lichtzwak röntgenbeeld. Immers, bij een gegeven duur van het onderzoek (maximaal bijv. enkele minuten) betekent een beperking van de totale dosis een beperking van de doseringsterkte die men op de patient kan toelaten, en daarmee — nog afhankelijk van de stralenabsorptie door de patient — van de hoogstens te bereiken helderheid van het scherm. Bij een maagdoorlichting, waarvoor men bijv. met een spanning van 90 kV op de röntgenbuis werkt en met een buisstroom van 2 mA, heeft het beeld dat men verkrijgt op een doorlichtingscherm van goede kwaliteit een gemiddelde helderheid van ca. 0,003 cd/m². Ter vergelijking zij vermeld dat een nachtelijk landschap bij volle maan een helderheid van gemiddeld 0,01 cd/m² bezit.

Om bij deze lage helderheid zo goed mogelijk te kunnen waarnemen, moet de arts eerst gedurende lange tijd, op zijn minst 15 minuten, in het donker verblijven. Zijn ogen zijn dan aan het lage helderheidsniveau geadapteerd, maar de gezichtscherpte en contrastgevoeligheid [1]) blijven toch nog vrij gering. Voor de diagnose van ziekten waarbij afwijkingen moeten worden geconstateerd van geringe grootte en die soms slechts een zwak contrast veroorzaken, is dit een zeer onaangename beperking. Het is dan ook begrijpelijk dat sedert het begin van de röntgendiagnostiek steeds de wens heeft bestaan naar een helderder doorlichtingsbeeld.

Wil men in het röntgenbeeld meer kunnen zien en tevens van de noodzaak van langdurige adaptatie worden verlost, dan is, zoals in 1942 door Chamberlain is aangetoond [2]), een helderheidsverhoging met minstens een factor 100 à 1000 noodzakelijk. Dit betekent dat men er niet komt met alleen een rendementsverhoging van de bestaande schermen. Deze zetten nl. ongeveer 5% van de er op vallende röntgenstralen in zichtbaar licht

[1]) De gezichtscherpte wordt gedefinieerd als $1/\alpha$, indien α de gezichtshoek van het kleinste nog juist onderscheidbare detail is. De contrastgevoeligheid definieert men als $1/c$, indien c het kleinste nog juist onderscheidbare contrast $\Delta B/B$ is; hierbij is B de helderheid van een achtergrond, $B + \Delta B$ de helderheid van een object dat tegen deze achtergrond wordt gezien.

[2]) W. E. Chamberlain, Fluoroscopes and fluoroscopy, Radiology **38**, 383-413, 1942.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

om, en wel in licht met ongeveer de gunstigste golflengte (d.i. in het geelgroene spectrale gebied, waar een gegeven vermogen van de straling de sterkste helderheidsindruk op het oog teweegbrengt). De winst die hier theoretisch nog mogelijk is, is dus hoogstens een factor 20.

De laatste jaren zijn er enige, op electronische hulpmiddelen berustende, methodes uitgewerkt waarmee het inderdaad mogelijk is de helderheid van het röntgenbeeld aanzienlijk te „versterken" [3]). Wij zullen in dit artikel een beeldversterker beschrijven die in het Philips laboratorium te Eindhoven is ontwikkeld. Dit toestel berust op het bekende principe van de beeldtransformator, eveneens een vinding uit dit laboratorium, die reeds in 1934 werd beschreven [4]). De röntgenbeelden die met ons apparaat worden verkregen zijn ongeveer 1000 maal helderder dan die op een normaal doorlichtingscherm.

Beschrijving van de beeldversterker

De belangrijkste details van de constructie van de beeldversterker zijn in *fig. 1* te zien. Een röntgenscherm, dat aangebracht is op een dunne drager van aluminium, is gemonteerd in een geëvacueerde glazen buis. In contact met het röntgenscherm bevindt zich een fotokathode. Laat men, door de glazen wand van de buis heen, röntgenstralen op het scherm vallen, dan wordt hierin fluorescentielicht opgewekt. Dit licht maakt electronen vrij uit de fotokathode; op elk punt van de fotokathode is het aantal per seconde vrijgemaakte foto-electronen evenredig met de lichtsterkte van het röntgenscherm op dat punt. Het „lichtbeeld" met al zijn variaties in helderheid wordt aldus omgezet in een „electronenbeeld" met overeenkomstige variaties in stroomdichtheid. Dit electronenbeeld wordt nu met behulp van een electrisch veld van bepaald verloop (electrostatische „electronenlens") afgebeeld op een tweede fluorescentiescherm, het kijkscherm, en wel 9× verkleind. De energie der op het kijkscherm vallende electronen wordt hier voor een deel weer in fluorescentielicht omgezet, en men ziet dus op het kijkscherm een 9× verkleinde reproductie van het beeld op het röntgenscherm. Het verkleinde beeld wordt met een eenvoudige microscoop met ongeveer 9-voudige vergroting bekeken, zodat men het röntgenbeeld ten

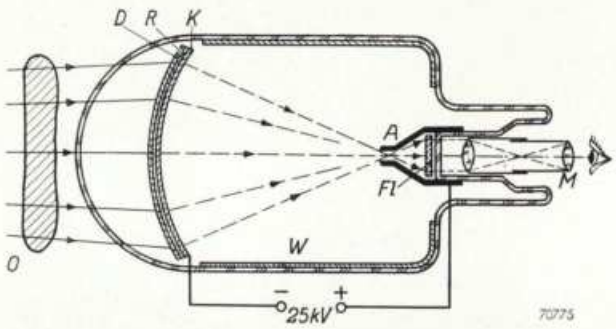

Fig. 1. Schematische doorsnede van de beeldversterkerbuis. *R* röntgenscherm, waarop de röntgenstralen vallen, die het te onderzoeken object *O* en de glazen wand van de buis zijn gepasseerd. *D* drager van röntgenscherm en fotokathode *K*. De in *R* opgewekte fluorescentiestraling maakt in de fotokathode electronen vrij. Het „electronenbeeld" wordt door het electrische veld tussen *K* en de doorboorde anode *A* verkleind afgebeeld op het kijkscherm *Fl*. Dit wordt met een eenvoudige microscoop *M* bekeken. *W* is een geleidende bekleding op de binnenwand van de buis.

slotte waarneemt in zijn oorspronkelijke grootte en rechtop (zowel de electronenlens als de microscoop levert een omgekeerd beeld).

Het beeld dat men door de microscoop ziet, is dus geheel gelijk aan hetgeen men op een normaal doorlichtingscherm zou zien, het is echter ongeveer 1000 maal helderder, aangenomen dat beeldversterker en doorlichtingscherm röntgenstraling van dezelfde intensiteit ontvangen.

Hoe komt de helderheidsversterking in de beeldversterker tot stand?

Twee (in wezen niet onafhankelijke) factoren dragen bij tot de versterking van de helderheid van het beeld.

De eerste, het eenvoudigst te begrijpen, factor is een vergroting van de totale lichtstroom, de zg. lumenversterking. De electronen die de fotokathode uitzendt, worden door het electrische veld niet alleen op het kijkscherm gefocusseerd maar zij worden ook versneld: tussen het kijkscherm en de fotokathode staat in ons geval een versnellende spanning van 25 kilovolt. Hoe meer energie een electron bij aankomst op het kijkscherm bezit, des te meer fluorescentielicht zal het hierin opwekken. Ondanks het feit dat slechts ca. 1 op de 10 lichtquanta van het röntgenscherm een foto-electron vrijmaakt, en wederom slechts ca. 10% van de electronenenergie op het kijkscherm in licht wordt omgezet, levert het kijkscherm dank zij de

---

[3]) J. W. Coltman, Fluoroscopic image brightening by electronic means, Radiology **51**, 359-367, 1948.
R. J. Moon, Amplifying and intensifying the fluoroscopic image by means of a scanning X-ray tube, Science **112**, 389-395, 1950.
R. H. Morgan en R. E. Sturm, The John Hopkins fluoroscopic screen intensifier, Radiology **57**, 556-560, 1951.
P. C. Hodges en L. Staggs, Electronic amplification of the röntgenoscopic image, Amer. J. of Röntgenology Rad. Ther. **66**, 705-710, 1951.

[4]) G. Holst, J. H. de Boer, M. C. Teves en C. F. Veenemans, An apparatus for the transformation of light of long wavelength into light of short wavelength, Physica **1**, 297-305, 1934.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

energietoevoer aan de electronen toch in totaal een 10 tot 15 maal zo grote lichtstroom (gemeten in lumens) als een normaal doorlichtingscherm waarop hetzelfde object wordt waargenomen.

De tweede, nog belangrijker, winstfactor is te danken aan de reeds genoemde electronenoptische verkleining van het beeld. Alle van de fotokathode afkomstige electronen werken aan de vorming van het beeld mee, en ook de energie die elk electron na doorlopen van het electronenoptische systeem in licht kan omzetten, is er onafhankelijk van of de electronen over een groot dan wel klein oppervlak worden verdeeld. Door te werken met een 9-voudige verkleining, concentreren wij de electronen op een 9^2 maal kleiner oppervlak, en de totale lichtstroom wordt dus door een ca. 80 maal kleiner oppervlak uitgestraald dan bij afbeelding op schaal 1 : 1. Dit betekent per definitie een 80 maal grotere helderheid [5]).

De totale helderheidsversterking is gelijk aan het product van de lumenversterking en de verkleiningswinst; in het geval van de beschreven buis dus 10 tot 15 maal 9^2, d.i. 800 tot 1200.

Het is misschien niet overbodig er op te wijzen dat de belangrijke helderheidswinst die de electronenoptische verkleining oplevert, niet verkregen kan worden door normale optische verkleining. Volgens de wet van Von Abbe verandert nl. de waargenomen helderheid van een vlak niet door plaatsing van om het even welk soort optisch instrument tussen het vlak en het waarnemend oog — althans wanneer we het instrument als ideaal mogen beschouwen, dwz. als we mogen afzien van absorptie- en reflectieverliezen in lenzen en spiegels (en als de uittreepupil van het instrument minstens zo groot is als de oogpupil).

Men kan dit heel eenvoudig inzien aan de hand van *fig. 2a*. Heeft het voorwerp de helderheid B en „ziet" het de lens onder een ruimtehoek ω, dan vangt de lens van het vlakje df een lichtstroom $\Phi = B\omega df$ op. Deze lichtstroom wordt door de lens geconcentreerd op een kleiner vlakje df' in het beeldvlak. Dit vlakje zendt dus weer de lichtstroom Φ uit, doch nu in de grotere ruimtehoek ω' (of, bij verstrooiing, in een nog grotere hoek). De helderheid van df' wordt $B' = \Phi/\omega' df'$, en aangezien uit de afbeeldingswetten volgt dat $\omega' df' = \omega df$ (sinuswet), is inderdaad $B' = B$.

Het hier geconstateerde verschil betekent geenszins dat de analogie tussen electronenoptica en lichtoptica op dit punt faalt. De wet van Von Abbe in de geciteerde eenvoudige vorm geldt nl. alleen indien voorwerp en beeldvlak zich in media met dezelfde brekingsindex bevinden, wat bij normale optische instrumenten altijd het geval is. Is de brekingsindex ter plaatse van het beeldvlak groter dan bij het voorwerp, dan kan wel degelijk de helderheid van het beeld groter zijn dan die van het voorwerp. Dit is nu juist wat zich in de electronenoptica voordoet. Het potentiaalveld, waarin de electronen bewegen, kan worden opgevat als een medium met een continu variërende brekingsindex, en wel is deze op elke plaats evenredig met de snelheid van de electronen. De brekingsindex ter plaatse van het kijkscherm is daardoor globaal 100 maal zo groot als ter plaatse van de fotokathode.

De analogie is daarmee niet alleen formeel hersteld, maar kan ook weer aanschouwelijk worden gemaakt. Ten gevolge van de continu verlopende brekingsindex krijgen we nu geen rechte doch gekromde „stralen". De stralengang voor de electrostatische electronenlens ziet er derhalve niet uit als in fig. 2*a* doch ongeveer als in fig. 2*b*. Men ziet dat daarbij de stralingstroom van het vlakje df binnen een ruimtehoek van vrijwel 2π opgevangen wordt en in een veel kleinere ruimtehoek op het vlakje df' wordt geconcentreerd.

Door de rol die de snelheid van de electronen hier speelt, ziet men dat de „lumenversterking" en de helderheidswinst door verkleining in feite toch op dezelfde oorzaak — de aanwezigheid van een versnellend electrisch veld — berusten.

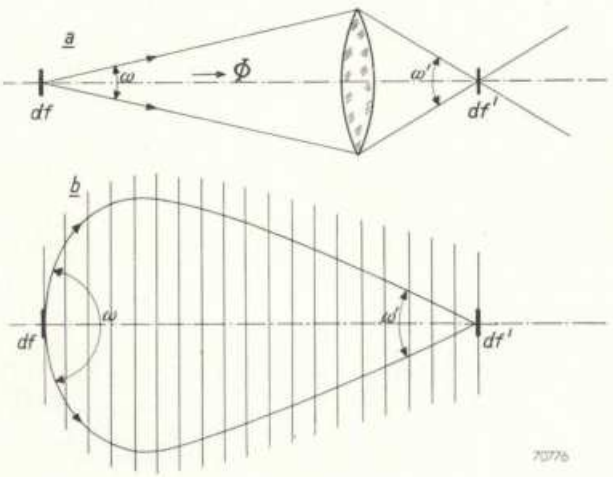

Fig. 2. *a*) Stralengang bij optische afbeelding van een vlakje df in een vlakje df' (ter toelichting van de wet van Von Abbe).
b) Hetzelfde bij electronenoptische afbeelding met een electrostatische lens als in de röntgenbeeldversterker.

Op grond van de wet van Von Abbe begrijpt men nu ook meteen dat bij de laatste stap in de beeldversterker, nl. de optische vergroting van het beeld op het kijkscherm door de microscoop, de helderheidswinst afkomstig van de electronenoptische verkleining niet teniet wordt gedaan (mits de microscoop aan de genoemde voorwaarde wat betreft de uittreepupil voldoet).

Het zal de lezer misschien opgevallen zijn dat in het bovenstaande, met name bij de bespreking van de lumenversterking, de lichtstroom van het kijkscherm telkens vergeleken werd met die van een normaal doorlichtingscherm, en niet, zoals voor de hand zou liggen, met de lichtstroom van het röntgenscherm in de beeldversterker zelf. De reden is, dat het laatstgenoemde scherm niet door het oog

[5]) Volgens een recente wijziging in de normalisatie van verlichtingskundige termen zouden we hier van „luminantie" moeten spreken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

behoeft te worden waargenomen en het fluorescentielicht hiervan dus eventueel een spectrale verdeling mag hebben die voor de waarneming zeer ongunstig is — ja, deze fluorescentiestraling zou voor het oog zelfs geheel onzichtbaar mogen zijn, dwz. ultraviolet of infrarood, mits de fotokathode er maar gevoelig voor is! In onze beeldversterker hebben wij een fotokathode toegepast waarvan het quantumrendement het hoogst is (ca. 10%) bij bestraling met blauw licht; voor het röntgenscherm is derhalve ook een blauw fluorescerende stof gekozen. Voor het kijkscherm daarentegen neemt men, als men de keuze heeft tussen verschillende stoffen met gelijk energierendement, natuurlijk een stof waarvan het fluorescentiespectrum zo goed mogelijk samenvalt met het maximum van de spectrale gevoeligheidskromme van het menselijke oog, dwz. een stof die een geelgroene fluorescentiekleur vertoont. Het is duidelijk dat men bij vergelijking van de helderheid van dit kijkscherm met die van het blauw lichtende röntgenscherm van de beeldversterker een nog veel grotere „helderheidsversterking" dan 1000× zou uitrekenen, die echter generlei practische betekenis heeft.

De naam „beeldversterker" of „helderheidsversterker" dient daarom nog even op de keper te worden beschouwd. In feite heeft men te maken met een beeldtransformator (Engels: image converter), die nl. het beeld van de onzichtbare röntgenstralen omzet in een zichtbaar beeld, op analoge wijze als de bekende toestellen die een infrarood in een zichtbaar beeld omzetten (zie het in [4]) aangehaalde artikel) en die reeds op allerlei manieren zijn toegepast. Dat bij deze transformatie in ons geval nog als tussentrap een, ook reeds zichtbaar, fluorescentiebeeld optreedt — evenals bij de normale doorlichting —, is alleen nodig omdat het niet mogelijk is de röntgenstralen met een goed rendement rechtstreeks foto-electronen (met niet te grote aanvangsnelheid) uit een fotokathode vrij te laten maken. Een behoorlijk rendement van deze electronenproductie is bij de röntgenbeeldversterker natuurlijk van het grootste belang, daar anders het effect van de daaropvolgende „versterking" te niet zou worden gedaan en men dan wel kon volstaan met de „beeldtransformatie" die reeds door het normale doorlichtingscherm wordt bewerkstelligd.

Bijzonderheden van de constructie

Het bij de fotokathode aangepaste, blauw fluorescerende röntgenscherm bestaat uit zinksulfide, geactiveerd met zilver. Het geelgroen lichtende kijkscherm is gemaakt van zeer fijnkorrelig zinksulfide-zinkselenide. De bruikbare kathode-oppervlakte heeft een diameter van 13,5 cm; dit is dus de maximale grootte van het waar te nemen object. Het beeldje op het kijkscherm is 9× kleiner, dus 1,5 cm in doorsnee.

Het electrische veld, dat de electronenoptische afbeelding bewerkstelligt, wordt in eerste instantie verkregen met slechts twee electrodes: de ene (kathode) wordt gevormd door het holle, sferisch gekromde oppervlak van de combinatie röntgenscherm-fotokathode, alsmede door een geleidende binnenbekleding op de glazen buiswand; de andere electrode (anode) heeft eveneens een bolvormig gekromd oppervlak, concentrisch met de fotokathode, en is voorzien van een gat om de electronen door te laten naar het kijkscherm, dat achter de anode gelegen is [6]). Tussen kathode enerzijds en anode anderzijds wordt een spanning van 25 kV aangelegd.

Deze eenvoudige constructie met slechts twee electrodes heeft bewezen zeer bruikbaar te zijn. De scherpte van de afbeelding is ruimschoots voldoende, en de veldsterkte aan de flauw gekromde fotokathode is zeer klein, hetgeen om een nog nader te noemen reden gewenst is. Toen de buis nog in een experimenteel stadium verkeerde, bood de configuratie ook voldoende vrijheidsgraden, nl. in de kromtestralen van kathode en anode, waarmee bijv. de mate van verkleining kon worden gevarieerd. Voor de practijk bleek het echter naderhand gunstiger, de binnenbekleding van de buis als afzonderlijke electrode uit te voeren en deze op een zwakke positieve potentiaal ten opzichte van de fotokathode te brengen. Zonder deze maatregel gaan nl. alleen de electronen van een bepaald centraal gedeelte van het oppervlak der fotokathode door het gat van de anode, de randgedeelten worden niet afgebeeld. Dank zij de hulpspanning gaan ook de electronen van de perifere delen door het gat, en het bleek aldus mogelijk de bruikbare beeldoppervlakte van het röntgenscherm nagenoeg te verdubbelen. Tevens wordt de, zonder hulpspanning aanwezige, kleine kussenvormige vertekening van het beeld vrijwel opgeheven. Een ander belangrijk voordeel van de (regelbare) hulpspanning is, dat men hiermee tijdens het werken van de buis het beeld op het kijkscherm op maximale scherpte kan instellen. Men kan daardoor bij de fabricage van de glazen buis de toleranties voor de electrode-afstanden relatief ruim stellen.

De spanning van 25 kV tussen kathode en anode kan worden betrokken van het bekende kleine hoogspanningsapparaat dat in dit laboratorium is ontwikkeld voor projectie-televisie [7]). Van dit apparaat wordt ook de spanning voor de buisbekleding afgetakt. De kathode wordt geaard,

[6]) Voor een uitvoeriger beschrijving van het principe van deze twee-electrodenlens zij verwezen naar een artikel van P. Schagen, H. Bruining en J. C. Francken, dat zal verschijnen in Philips Research Reports **7**, No. 2.

[7]) G. J. Siezen en F. Kerkhof, Philips techn. T. **10**, 157, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zodat men slechts één van de drie polen van de beeldversterker geschikt behoeft te maken voor hoge spanning. Het in de buis vereiste vermogen is zeer gering: voor normale doorlichtingen is de fotostroom van de orde van 10^{-9} A. Om deze reden en wegens de geringere eisen die in ons geval aan de constantheid van de spanning worden gesteld (een principieel voordeel van zuiver electrostatisch werkende electronenoptische systemen), zou voor ons doel een nog eenvoudiger hoogspanningsapparaat kunnen worden geconstrueerd.

leiding werd gezegd, dat de röntgenoloog met de beeldversterker fijnere details zal kunnen zien dan op het normale doorlichtingscherm, dank zij de grotere gezichtscherpte en contrastgevoeligheid van het oog bij het hogere helderheidsniveau. Opdat deze verwachting — die we straks nog nader zullen preciseren — kan worden bewaarheid, is het een noodzakelijke voorwaarde dat de onscherpte en het contrastverlies, die de beeldversterker evenals elk ander waarnemingsinstrument zèlf introduceert, binnen zekere grenzen blijven.

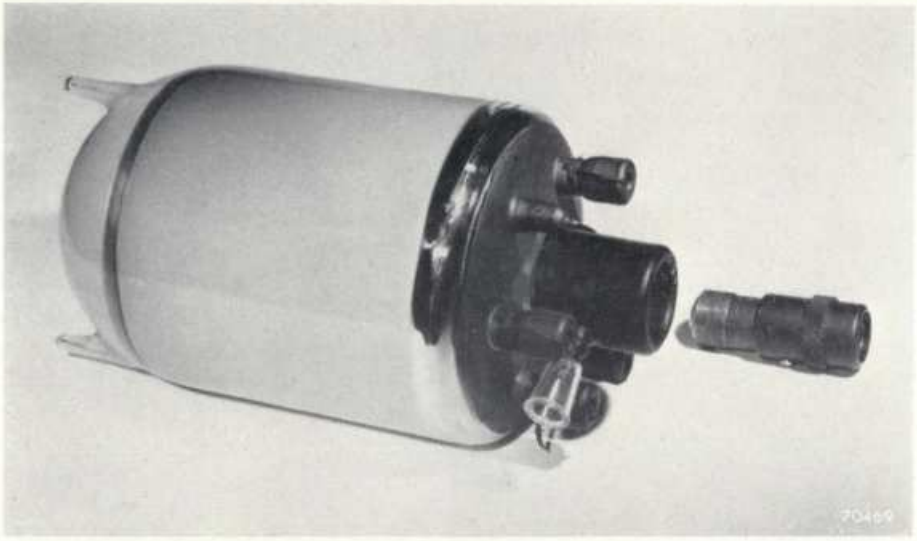

Fig. 3. De Philips röntgenbeeldversterker, die een ca. 1000 maal helderder beeld levert dan een normaal doorlichtingscherm. De buis is 45 cm lang en 17,5 cm wijd. Het nuttig te gebruiken schermoppervlak is een cirkel met diameter 13,5 cm. Rechts ziet men de kijkopening, waarin het er naast gelegde microscoopje wordt geschoven.

In *fig. 3* is een foto van de beeldversterkerbuis gereproduceerd. Deze is cylindervormig, met een diameter van 17,5 cm. De totale lengte, inclusief de kleine microscoop, is 45 cm. Om de glazen buis tegen stoten en de omgeving tegen verstrooide röntgenstralen te beschermen, wordt de buis geplaatst in een met lood gevoerde bus van aluminium, die gemakkelijk op een statief kan worden gemonteerd; zie *fig. 4*. Buis en bus wegen tezamen ca. 7,5 kg.

Scherpte en contrast van het beeld

Bij gebruik van de beeldversterker behoeft de röntgenoloog vrijwel geen tijd meer op te offeren om zijn ogen te laten adapteren, en de waarneming kan in een bijna normaal verlichte ruimte geschieden. Voor de practijk zijn dit al zeer belangrijke voordelen, die waarschijnlijk zullen opwegen tegen het nadeel dat men het beeld niet meer vrij kan overzien doch door een oculair moet bekijken. Bovendien mag men verwachten, zoals in de in-

Scherpte

Bij het normale doorlichten wordt de onscherpte in het beeld bepaald door de eindige afmetingen van het focus van de röntgenbuis (halfschaduwbreedte of geometrische onscherpte) en door de dikte en korrelgrootte van het doorlichtingscherm (intrinsieke of scherm-onscherpte). De scherm-onscherpte bedraagt gewoonlijk ca. 0,7 mm, soms minder, tot 0,4 mm. De geometrische onscherpte is gewoonlijk iets kleiner. De totale onscherpte van het doorlichtingsbeeld (bij benadering gelijk aan de wortel uit de som der kwadraten der afzonderlijke onscherpten [8]) zal derhalve iets minder dan 1 mm bedragen.

De scherm-onscherpte kan men aanzienlijk verminderen door het scherm dunner (en fijner van korrel) te maken. Men doet dit bij de normale doorlichtingschermen niet, omdat een dunner

[8]) Zie: H. A. Klasens, De onscherpte van röntgenbeelden, Philips techn. T. **9**, 364-369, 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

scherm meer röntgenstraling ongebruikt zou doorlaten, zodat men een geringer lichtrendement van het scherm zou krijgen [9]). Bovendien zou de grotere scherpte weinig nut opleveren, aangezien bij de lage helderheid van het normale doorlichtingscherm de gezichtscherpte van het waarnemende oog toch te gering is om kleinere details te kunnen onderscheiden.

Bij de beeldversterker is de zaak anders. Ook hier treedt in de eerste plaats een onscherpte in het beeld op ten gevolge van de intrinsieke onscherpte van het gebruikte röntgenscherm. Thans echter is er geen bezwaar tegen om het scherm relatief dun te kiezen en zodoende iets van de verkregen helderheidswinst weer op te offeren ten bate van de beeldscherpte. Dit heeft nu ook zin, omdat het oog bij het helderheidsniveau van de beeldversterker een zo grote gezichtscherpte bezit dat het ter dege van een grotere beeldscherpte kan profiteren.

Om deze reden hebben wij de dikte van het röntgenscherm in de beeldversterker dunner gekozen dan voor een normaal doorlichtingscherm gebruikelijk is. Te ver mag men anderzijds met de dikteverminding, ook uit ander oogpunt dan dat van het rendement, weer niet gaan, zoals naderhand zal blijken.

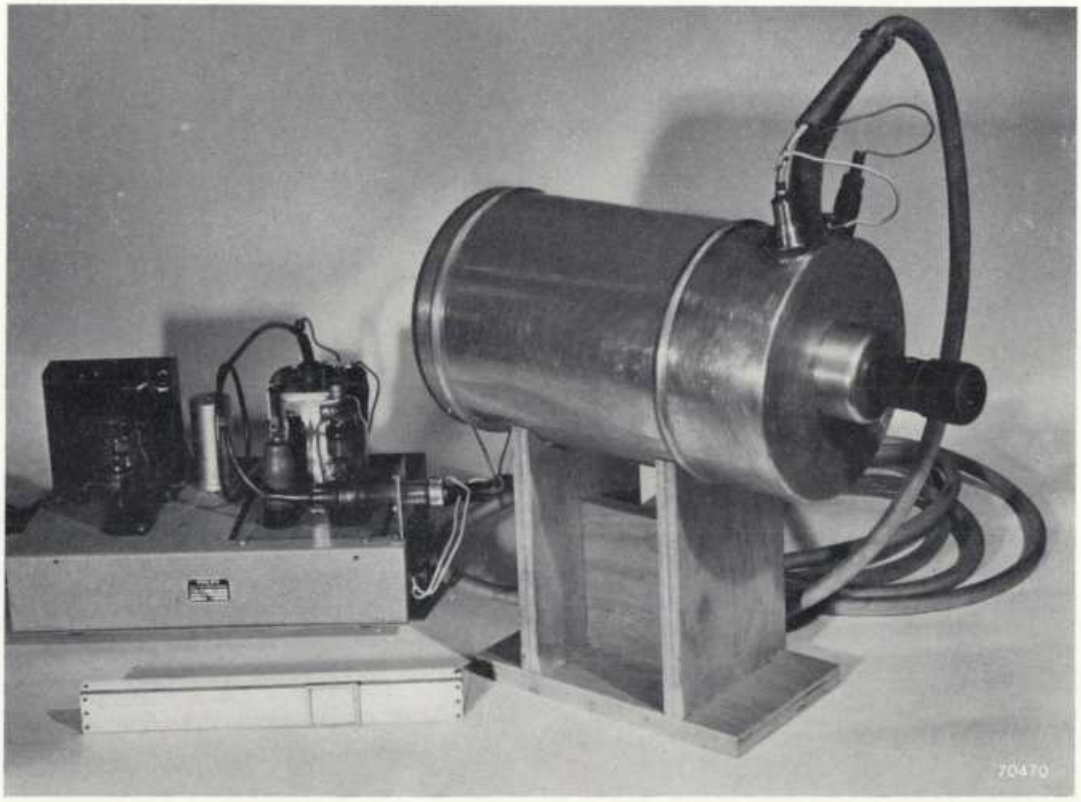

Fig. 4. De volledige apparatuur voor het doorlichten met de beeldversterker. De buis is in een met lood gevoerde aluminium bus geplaatst. Het geheel kan gemakkelijk aan een statief worden bevestigd. Links ziet men het kleine hoogspanningsapparaat dat de vereiste gelijkspanning van 25 kV levert.

In het geval van de beeldversterker heeft men nog andere mogelijke oorzaken van onscherpte. Deze mogen de verkregen grotere scherpte natuurlijk niet bederven. Dit blijkt bij onze buis inderdaad niet het geval te zijn. Het kijkscherm heeft een zeer fijne korrel en is zeer dun (de indringdiepte van electronen van 25 kV is ca. 12 μ), zodat zijn intrinsieke onscherpte, herleid op ware beeldgrootte, kleiner is dan van het röntgenscherm. De onscherpte van de electronenoptische afbeelding is op zijn minst een orde van grootte kleiner (zie formule (26) in het in noot [6]) aangehaalde artikel) en kan dus worden verwaarloosd, evenzo de be-

[9]) Er bestaat wat het rendement betreft een optimale dikte, want bij een zeer dik scherm wordt klaarblijkelijk teveel van het geëmitteerde licht reeds binnen het scherm geabsorbeerd. (Dit antagonisme tussen nuttige absorptie van de aankomende en schadelijke absorptie van de uittredende straling doet zich bij de beeldversterker ook nog in de fotokathode en in het kijkscherm voor.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

perking in scheidend vermogen van de microscoop waarmee het kijkscherm wordt bekeken. In de fotokathode ontstaat evenmin een merkbare onscherpte, daar deze in direct contact is met de fluorescerende laag van het röntgenscherm en, om de vrijgemaakte foto-electronen niet teveel te absorberen, slechts uiterst dun is.

Het resultaat van dit alles is, dat de totale onscherpte van de beeldversterker slechts ca. 0,4 mm bedraagt. Teneinde van deze geringere „intrinsieke" onscherpte volledig profijt te trekken, moet men ook de eerder genoemde geometrische onscherpte zoveel mogelijk beperken. Het is daarom wenselijk in combinatie met de beeldversterker een röntgenbuis met zeer klein focus te gebruiken („fijnfocusbuis").

Contrastweergave

De röntgenstralen die het te onderzoeken object hebben doorlopen, zijn in een van plaats tot plaats verschillende mate verzwakt; in het aldus ontstane „stralingscontrast" zetelt de informatie die we over het object kunnen verkrijgen, d.i. het beeld. De processen bij de omzetting van de röntgenstralen in fluorescentielicht, vervolgens in foto-electronen en ten slotte weer in licht, zijn bij de zeer kleine electronenstroom die in de beeldversterker optreedt zuiver lineair. De contrasten in het beeld blijven dus in principe onveranderd (gamma = 1), in tegenstelling tot bijv. de fotografische weergave (waarbij gamma = 2,5 tot 3 kan zijn!).

Door verschillende oorzaken echter ontstaat in de beeldversterker een „sluier", d.i. een min of meer gelijkmatig over het beeld verdeelde helderheidsbijdrage, die een contrastverlies ten gevolge heeft. Het glazen venster van de buis waardoor de röntgenstralen binnentreden, verstrooit deze ten dele en levert dus een diffuse straling op het röntgenscherm. Evenzo worden de röntgenstralen die niet door het röntgenscherm zijn geabsorbeerd en die op de wand van de buis vallen, voor een klein deel diffuus terug naar het röntgenscherm verstrooid. Ook een fractie van het blauwe fluorescentielicht dat de zeer dunne fotokathode nalaat te absorberen, komt na reflectie aan de binnenwand van de buis op de fotokathode terug en maakt hier alsnog, maar op verkeerde plaatsen, foto-electronen vrij. Tot op zekere hoogte geldt dit ook voor het nalichten van het röntgenscherm. Verder heeft de fotokathode een zekere thermische, van de ontvangen belichting onafhankelijke, electronenemissie; eveneens kan er een veldemissie van de fotokathode optreden. Beide effecten leveren een gelijkmatige lichtbijdrage op het gehele kijkscherm. Een gedeelte van alle op het kijkscherm aankomende electronen wordt hier gereflecteerd en kan uit de wanden der anoderuimte (en uit eventuele gasresten) positieve ionen vrij maken, die naar de opening van de anode kunnen diffunderen en dan door het veld naar de fotokathode worden versneld, waar zij weer electronen kunnen vrij maken, die een diffuse lichtbijdrage veroorzaken. Ten slotte treedt in het kijkscherm wederom een verstrooiing van het hierin opgewekte licht op, men krijgt daardoor een soort halo, die in de hand gewerkt wordt door herhaalde reflecties in de glazen drager van het scherm, waarmee de korrels in optisch contact zijn.

Zeer storende sluierverschijnselen zouden optreden als een deel van het licht van het kijkscherm weer op de fotokathode zou vallen (een soort terugkoppeling); dit is echter verhinderd door het kijkscherm aan de achterzijde te bedekken met een dunne laag aluminium, die de snelle electronen nagenoeg alle doorlaat doch het naar achteren gestraalde licht volledig onderschept [10]).

Ook de andere, hierboven opgesomde, sluierbijdragen zijn door allerlei maatregelen zover mogelijk gereduceerd, en het resultaat is dat het contrastverlies binnen redelijke grenzen blijft. Wij vermelden hier slechts enkele dergelijke maatregelen. De bekleding van de binnenwand van de buis is relatief slecht reflecterend gemaakt voor blauw licht. De electrodenconfiguratie is zodanig dat geen grote veldsterkten op de fotokathode ontstaan en derhalve weinig veldemissie optreedt. Hiervoor en voor de beperking van de thermische emissie is het tevens van belang dat de uittreepotentiaal van de kathode vrij hoog is.

Nauwkeurige gegevens over de grootte van de sluier kunnen op dit ogenblik nog niet worden verstrekt, maar om de gedachte te bepalen, willen we aannemen dat de sluier 10% bedraagt van de totale lichtstroom die het kijkscherm, zonder sluier, zou uitzenden (dit getal zal wellicht niet al te ver bezijden de waarheid zijn). Voor de contrasten betekent dit dat wij, waar wij zonder sluier bijv. het contrast tussen een helderheid 105 en een gemiddelde helderheid 100 moesten waarnemen, nu een contrast van 115 tegen 110 moeten zien. De contrastvermindering is dus van weinig betekenis. Bij grote contrasten is de achteruitgang groter (10 tegen gemiddeld 100 bijv. wordt 20 tegen 110), maar die zijn in het algemeen toch gemakkelijk te zien.

Principiële beperking van het kleinste waarneembare objectdetail

In hoeverre zal nu de röntgenoloog met de beeldversterker inderdaad meer — dat betekent details met kleinere afmetingen en zwakkere contrasten — kunnen zien dan op het normale doorlichtingscherm?

[10]) Vgl. J. de Gier, Philips techn. T. **10**, 133, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het antwoord op deze vraag moet uiteraard door de practijk worden gegeven. Maar terwijl thans nog niet voldoende medische ervaring met het instrument is opgedaan om de vooruitgang, die er ongetwijfeld is, in getallen te kunnen uitdrukken, kan men toch reeds op theoretische gronden vaststellen dat het minimale met de beeldversterker waarneembare objectdetail niet beneden een zekere grens zal kunnen komen. Dit heeft een zeer fundamentele oorzaak, nl. het quanteuze karakter van de röntgenstraling. Het zijn de onderzoekers Sturm en Morgan geweest die hierop voor het eerst de aandacht gevestigd hebben [11]).

De energiepakketjes (quanta, fotonen) ter grootte van $h\nu$, waaruit elke straling bestaat (h = constante van Planck, ν = trillingsfrequentie), worden door de bron niet met een volmaakte regelmaat uitgezonden, en evenmin met volmaakte regelmaat door een medium, bijv. het röntgenscherm of het netvlies, geabsorbeerd. Men kan wel spreken van een gemiddeld aantal N quanta per gegeven tijdsinterval op een gegeven oppervlak en hierdoor wordt de intensiteit der geëmitteerde resp. geabsorbeerde straling bepaald. Beschouwt men echter een aantal dergelijke tijdsintervallen, dan zal het aantal quanta in ieder interval niet gelijk aan N zijn: ten opzichte van dit gemiddelde treden fluctuaties op, die een statistisch karakter dragen en waarvan de orde van grootte, becijferd op grond van de waarschijnlijkheidsrekening, gegeven wordt door de zg. standaardafwijking, $\sqrt{N}$. De orde van grootte van de relatieve fluctuaties in de straling wordt gegeven door de zg. variatiecoëfficient, die gelijk is aan $\sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$.

Deze natuurlijke fluctuaties (het „ruisen" van de straling) betekenen een principiële beperking voor de gedetailleerdheid van de informatie die de straling kan overbrengen, of concreter gezegd: voor de minimale stralingscontrasten die door middel van de geabsorbeerde quanta kunnen worden medegedeeld.

Deze beschouwing kan men direct toepassen op het menselijk oog. Om de gedachte te bepalen, beschouwen we een vlakje van het object ter grootte van 0,1 mm². Tot de helderheidsgewaarwording hiervan kunnen die lichtquanta bijdragen die het vlakje binnen de zg. accumulatietijd (T) van het oog in de oogpupil zendt. Slechts een kleine fractie hiervan wordt nuttig in het netvlies geabsorbeerd, dwz. geeft aanleiding tot een prikkel die via de oogzenuw naar de hersenen gaat. De fluctuatie van dit aantal quanta kunnen wij rechtstreeks als fluctuatie van de waargenomen helderheid van het vlakje opvatten, en het blijkt dat het verschil in helderheid tussen het vlakje en de omgeving zeker niet kan worden opgemerkt indien het contrast niet op zijn minst 3 tot 5 maal zo groot is als de genoemde relatieve fluctuatie. De onderste grens voor het waarneembare contrast is daarmee uitgedrukt in termen van het „ruisen" van de nuttig geabsorbeerde lichtquanta. Men begrijpt nu ook direct dat men, naarmate men grotere vlakjes beschouwt (dus meer quanta aan de helderheidsindruk laat meewerken), kleinere contrasten zal kunnen waarnemen; zie bijv. de bekende contrast-detail-diagrammen die bij het röntgenonderzoek van fantomen worden verkregen, *fig.* 5 [12]).

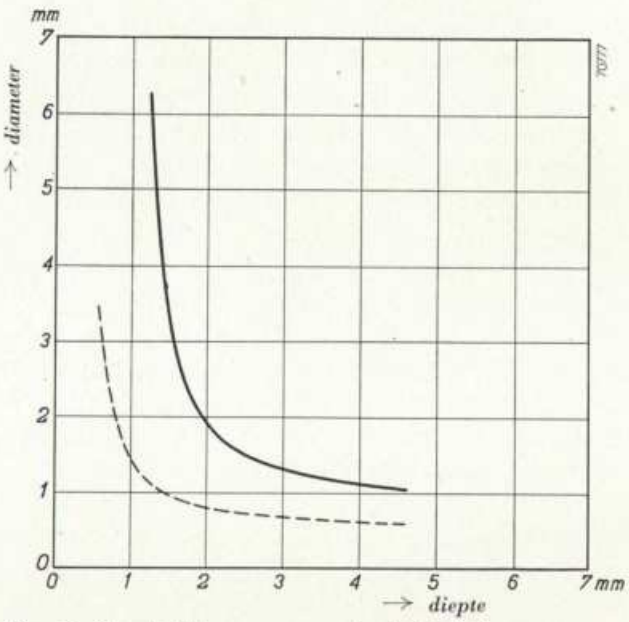

Fig. 5. Voorbeeld van een contrast-detail-diagram, verkregen met behulp van een röntgenfantoom. Dit bestaat uit een aantal „Philite"-platen, in één waarvan gaten van verschillende diepte en diameter zijn geboord. De getrokken lijn geeft als functie van de gatdiameter de gatdiepte (contrast!) aan die minstens vereist is opdat een gat bij normaal doorlichten van het fantoom te zien is.
(De gestippelde kromme geeft het resultaat weer van voorlopige proeven met de beeldversterker, onder dezelfde omstandigheden.)

Verder begrijpt men dat bij verhoging van het helderheidsniveau de contrastgevoeligheid zal toenemen. Dit gaat evenwel langzamer dan men uit de daling der relatieve fluctuaties zou concluderen, aangezien met toenemende helderheid het percentage der nuttig geabsorbeerde lichtquanta daalt (o.a. door een verzadigingsverschijnsel in de oogzenuw), evenals de accumulatietijd T.

[11]) R. E. Sturm en R. H. Morgan, Screen intensification systems and their limitation, Amer. J. Röntgenology Rad. Ther. **62**, 617-634, 1949.

[12]) Zie: G. C. E. Burger, Fantoomproeven met röntgenstralen, Philips techn. T. **11**, 300, 1949.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Laten we nu overgaan naar de röntgendiagnostiek en daarbij weer een oppervlakje van 0,1 mm² van het röntgenscherm beschouwen. Bij een longdoorlichting vallen hierop normaliter gemiddeld 100 000 röntgenquanta per seconde. Hiervan absorbeert het normale doorlichtingscherm 65%, en de accumulatietijd T van het oog bij het normale doorlichten is ca. 0,1 sec. Het aantal röntgenquanta dat werkzaam is voor het verstrekken van informatie aangaande het beschouwde detail van de doorlichte long bedraagt dus ca. 6500. Een geabsorbeerd röntgenquantum (van 70 kV) maakt in het scherm gemiddeld 5000 lichtquanta vrij. We hebben dan dus ruim $3 \cdot 10^7$ werkzame lichtquanta; maar deze treden in „pakketjes" van telkens 5000 quanta op, en dientengevolge — dit is het cardinale punt van het betoog — kan het grote aantal quanta, waarvoor men (als alle quanta onafhankelijk van elkaar optraden) de geringe relatieve fluctuatie van 1/5600 zou vinden, toch niet méér informatie verstrekken dan hetgeen de oorspronkelijke 6500 röntgenquanta vermochten te bevatten, met de veel grotere relatieve fluctuatie van 1/80.

Voor de normale doorlichting is deze waarschuwing niet actueel. Van de verkregen lichtquanta valt nl. slechts een zeer gering deel in de oogpupil (zie *fig. 6*), zodat men in het netvlies slechts 120 nuttig geabsorbeerde quanta krijgt, dus nog veel minder dan er röntgenquanta waren. Het oog zal dus in het röntgenbeeld van objecten ter grootte van 0,1 mm² geen contrasten kleiner dan 3 tot 5 maal 1/11 kunnen onderscheiden en er blijft een groot deel van de informatie die de röntgenquanta bevatten ongebruikt.

Bij gebruik van de beeldversterker is de zaak weer anders. We beginnen hier iets ongunstiger, aangezien van de bovengenoemde 100 000 röntgenquanta, die per seconde op 0,1 mm² van het dunnere röntgenscherm vallen, hierin minder geabsorbeerd worden, terwijl voor het hogere helderheidsniveau van de beeldversterker de accumulatietijd T van het oog iets korter is. Het aantal werkzame geabsorbeerde röntgenquanta kunnen wij hier stellen op ca. 1750. Maar de in het röntgenscherm hierdoor opgewekte lichtquanta worden thans beter gebruikt (zie fig. 6); men kan schatten dat het beschouwde vlakje thans ongeveer 20 000 nuttig geabsorbeerde lichtquanta oplevert. Dit aantal is aanzienlijk groter dan het aantal werkzame röntgenquanta, dus de contrastgevoeligheid van het oog is nu groot genoeg om de volle informatie van de röntgenquanta te kunnen registreren — echter zoals vanzelf spreekt, niet méér dan dat.

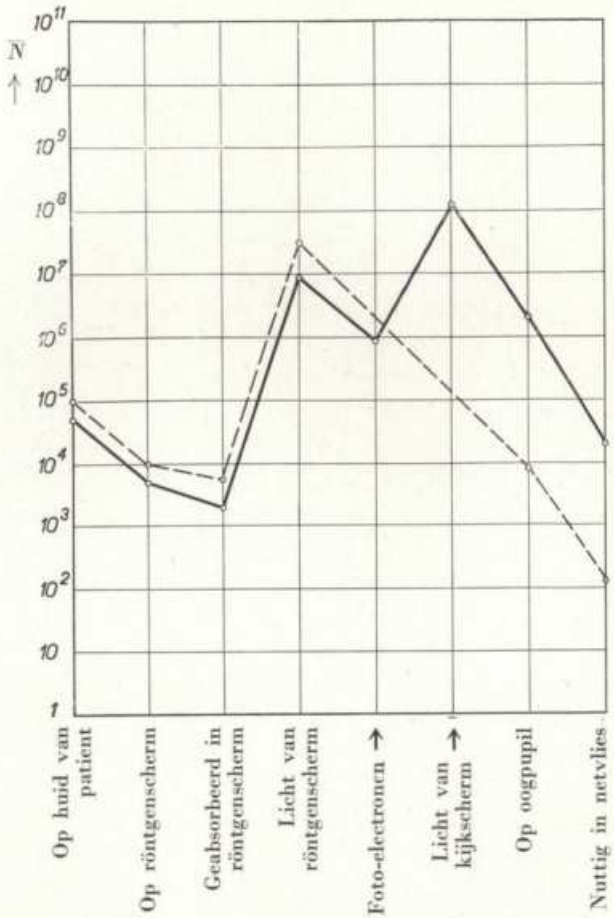

Fig. 6. Aantallen quanta die werkzaam zijn op diverse plaatsen bij het doorlichten van een long, en wel in een stralenbundel corresponderend met een oppervlakje van 0,1 mm² op het röntgenscherm. Spanning op de röntgenbuis 70 kV, stroom 2,5 mA, afstand van röntgenfocus tot scherm 70 cm.
Gestippelde lijn: normaal doorlichten, waarbij het oog de accumulatietijd 0,1 sec heeft.
Getrokken lijn: bij gebruik van de beeldversterker, waarbij de accumulatietijd van het oog iets kleiner is.

Deze situatie is geheel analoog aan die bij het optisch vergroten. In een beeld dat bijv. door een microscoopobjectief wordt ontworpen, zijn de fijne details van het object slechts tot een zekere grens gescheiden, de „informatie" aangaande het object is beperkt door het scheidend vermogen van het objectief (hetwelk bepaald wordt door de lensfouten en in laatste instantie door de golflengte van het licht). Het scheidend vermogen van het oog is veel geringer; men bekijkt daarom het ontworpen beeld door een sterk vergrotend oculair. De grootste nuttige vergroting van het oculair is nu die waarbij de door het objectief gescheiden weergegeven details ook door het oog gescheiden worden gezien. Voert men de vergroting van het oculair nog verder op, dan worden de details wel onder nog grotere gezichtshoeken gezien, maar er worden niet méér details waarneembaar, de informatie van het beeld is reeds uitgeput. Men spreekt dan van „lege vergroting". Evenzo

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kunnen wij nu bij de beeldversterker zeggen, dat een gedeelte van de helderheidsversterking, nl. overeenkomend met de factor waarmee het aantal in het oog werkzame lichtquanta het aantal in het röntgenscherm werkzame röntgenquanta overtreft, als „lege versterking" kan worden beschouwd.

De conclusies uit dit betoog zijn de volgende: 1) Van de helderheidsversterking met een factor 1000, die onze beeldversterker levert, is hoogstens ongeveer een factor 20 „nuttige" versterking [13]); de resterende factor 50 draagt niet bij tot vermindering van het kleinste zichtbare contrast, maar heeft wel groot practisch belang, daar het kijken hierdoor wordt vergemakkelijkt (geen adaptatie vereist). 2) Wil men van de beeldversterker profijt trekken om de röntgendosis op de patient te verminderen (bij gelijk blijvende waarneemingsduur), dan gaat dit onvermijdelijk gepaard met het prijsgeven van „informatie", die nu immers door het aantal röntgenquanta bepaald is. Indien men genoegen wil nemen met dezelfde informatie als bij de normale doorlichting, dan zal men bij het longonderzoek de röntgendosis theoretisch hoogstens kunnen reduceren tot ongeveer $^1/_{15}$, en men houdt dan nog een helderheidswinst van een factor ca. 60 over, die de vereiste adaptatietijd zeer sterk bekort. Bij dikkere objecten worden de toelaatbare reductiefactoren kleiner.

Beeldversterker en röntgenfotografie

Door een soortgelijke beschouwing als hierboven kan men inzien dat met de beeldversterker nooit eenzelfde hoge beeldkwaliteit kan worden bereikt als met de normale röntgenfotografie (contactfotografie). De foto dankt zijn superioriteit hieraan, dat de accumulatietijd van de fotografische emulsie niet beperkt is, zoals die van het oog, terwijl hij tevens het geaccumuleerde vasthoudt, zodat de bestralingsduur van de patient niet langer dan de accumulatietijd is. Men komt derhalve — als men niet een serie opnamen wil maken — in het algemeen niet tot gevaarlijk grote doses en kan daarom bij elk object de röntgenintensiteit en/of belichtingstijd zo regelen dat de gunstigste gemiddelde zwarting wordt verkregen. Bij een bepaalde representatieve filmsoort vindt men dat hiervoor per 0,1 mm² 20 000 röntgenquanta (een energie van ca. 0,001 erg) nuttig moeten worden geabsorbeerd. De gezwarte film wordt bekeken voor een lichtkast. Het verlichtingsniveau kan men willekeurig hoog opvoeren, en men kan daardoor zorgen dat het aantal lichtquanta in het netvlies in ieder geval groot genoeg is opdat alle „informatie" van de foto inderdaad waargenomen wordt (*fig. 7*). De verschillen in beeldkwaliteit tussen normale doorlichting, beeldversterker en contactfoto beantwoorden nu direct aan de verschillen in aantallen nuttige quanta 120 - 1750 - 20 000, voor een longonderzoek. Bij sterker absorberende objecten (bijv. bij een maagdoorlichting) wordt het overwicht van de foto veel duidelijker: deze blijft dan op het peil van 20 000 quanta, terwijl de twee eerstgenoemde aantallen quanta veel kleiner worden.

Onder deze omstandigheden is het te begrijpen dat het principe van de electronische beeldversterking ten opzichte van de normale röntgenfotografie geen voordeel kan brengen. Wèl kan de beeldversterker met voordeel worden gebruikt voor de röntgen-camera-fotografie. In dit tijdschrift is herhaaldelijk uiteengezet dat men bij deze techniek, waarbij het doorlichtingsbeeld met behulp van een camera verkleind wordt gefotografeerd, moeite heeft om voldoende licht op de film te krijgen — reden waarom men voor dit doel speciale uiterst lichtsterke optieken heeft ontwikkeld [14]). De beeldversterker, die een zeer lichtsterk, verkleind beeld levert, dat men gemakkelijk op schaal 1:1 kan fotograferen, kan hierbij voortreffelijk te pas worden gebracht. Tevens zal de beeldversterker wellicht de oplossing brengen van het oude probleem der röntgencinematografie. De reeds genoemde röntgen-camera-fotografie heeft de oplossing van dit probleem, wat de mechanische zijde er van betreft, al in zicht gebracht; de stap naar de cinematografie lijkt van hier relatief klein, maar kon slechts met grote omzichtigheid worden genomen, gezien het feit dat voor het maken van de talrijke opeenvolgende foto's van een film de totale aan de patient toe te dienen röntgendosis weer vrij groot wordt. Vermindering van de röntgenintensiteit, teneinde de totale dosis bij de filmopname te beperken, was slechts in beperkte mate mogelijk, daar men dan, ook bij gebruik van een zeer lichtsterke optiek, te weinig licht overhield om een voldoende zwarting van de film te verkrijgen. Deze moeilijkheid wordt door

[13]) Deze factor is groter dan de verhouding 1750/120, die men uit het voorbeeld (fig. 6) zou afleiden, want wegens de daling van de accumulatietijd T en van het percentage fotonen dat prikkels in de oogzenuw veroorzaakt, heeft men een relatief hogere helderheid nodig om even veel nuttig in het oog geabsorbeerde fotonen te krijgen als er nuttig geabsorbeerde röntgenfotonen zijn.

[14]) W. Hondius Boldingh, Röntgen-camera-fotografie met behulp van spiegeloptiek, Philips techn. T. **13**, 281-293, 1951 (No. 10).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

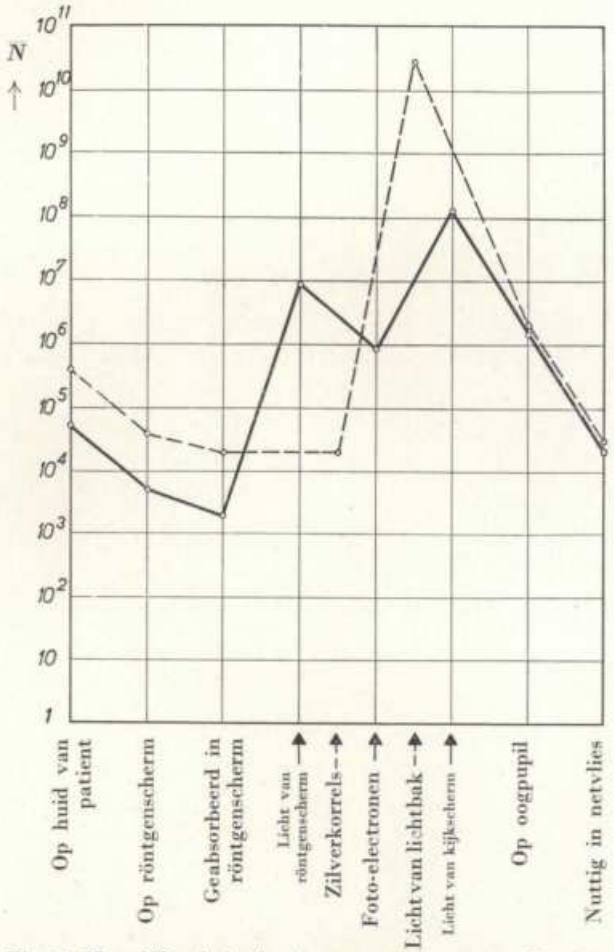

Fig. 7. Hetzelfde als in fig. 6, nu voor een normale röntgenfoto (contactfoto), gestippelde lijn. Getrokken is de lijn voor de beeldversterker uit fig. 6 nog eens weergegeven.

de winst in helderheid die de beeldversterker geeft, uitgeschakeld: van het beeldje op het kijkscherm zal men, ook bij aanzienlijk kleinere röntgenintensiteit dan voor röntgen-camera-fotografie gebruikelijk is, met een niet eens zo bijzonder lichtsterke optiek een film kunnen opnemen. Dat men door vermindering van de röntgenintensiteit de beeldkwaliteit (de beschikbare „informatie") benadeelt, is na het voorafgaande wel duidelijk. Het is echter bekend dat bij de cinematografie in het algemeen iets van de beeldkwaliteit mag worden opgeofferd: men verkrijgt immers additionele informatie doordat de indrukken van opeenvolgende beelden worden gesommeerd.

Samenvatting. De röntgenstralendosis die een patient bij doorlichting ontvangt, moet zoveel mogelijk worden beperkt, teneinde de kans dat de patient schade van een onderzoek ondervindt tot een minimum terug te brengen. Hierdoor wordt de bereikbare helderheid van het beeld op een normaal doorlichtingscherm zo gering, dat voor het bekijken er van een lange adaptatietijd nodig is, terwijl de gezichtscherpte en de contrastgevoeligheid van het oog bij die lage helderheid vrij klein zijn. Verbetering kan hierin worden gebracht door opvoeren van de helderheid („versterking") van het röntgenbeeld. De electronenbuis waarmee dit thans practisch mogelijk is gemaakt, werkt volgens het principe van de beeldtransformator. De röntgenstralen produceren een beeld op een fluorescerend scherm. Door de fluorescentiestraling worden electronen vrijgemaakt uit een, op het scherm aangebrachte, fotokathode. Deze electronen worden door een electrostatische electronenlens, die met een spanning van 25 kV werkt, gefocusseerd tot een 9× verkleind beeld op een tweede fluorescentiescherm, het kijkscherm, dat met een eenvoudige, 9× vergrotende, microscoop wordt bekeken. De helderheidswinst van een factor 800 tot 1200 ten opzichte van normaal doorlichten is ten dele te danken aan het feit dat het versnellende veld energie aan de electronen toevoert en ten dele aan de electronenoptische verkleining van het beeld. Het scheidend vermogen van de beeldversterker is beter dan dat van de beste doorlichtingschermen. Het beeld is door allerlei oorzaken behept met een zekere sluier, die de contrasten een weinig, doch niet in ernstige mate, vermindert. Een nadere beschouwing van de onderste grens voor het waarneembare objectdetail, gebaseerd op de spontane fluctuaties van het aantal quanta in de röntgen- resp. lichtstraling, toont aan, dat bij opvoeren van de helderheidsversterking tot ongeveer een factor 20 steeds meer „informatie" uit het beeld te halen is. Daarboven wordt de informatie beperkt door het aantal meewerkende röntgenquanta, maar de veel grotere versterkingsfactor van de beeldversterker levert wèl het voordeel dat men het beeld zonder voorafgaande adaptatie in een vrijwel normaal verlichte ruimte kan bekijken. Ook maakt de beeldversterker, toegepast in combinatie met een filmcamera, het mogelijk over te gaan tot röntgencinematografie, zonder dat daarbij de dosis op de patient gevaarlijk groot behoeft te worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN GESTABILISEERDE VOEDINGSGELIJKRICHTER VOOR 5000 V, 50 mA

door P. PERILHOU † *) en J. CAYZAC *). 621.314.67:621.316.722.1

Een gelijkspanning die bij de grootste belastingsveranderingen slechts ongeveer 0,01% varieert, die 3000 maal kleinere relatieve fluctuaties vertoont dan de netspanning, en die tussen wijde grenzen instelbaar is — ziedaar enige van de voornaamste kenmerken van een gestabiliseerde gelijkrichter, welke in het bijzonder is ontworpen ten behoeve van laboratoriumwerk op het gebied van decimeter- en centimetergolven.

Een gelijkrichter zal in vele gevallen een accubatterij (met bijbehorende laadinrichting) als gelijkstroombron met voordeel kunnen vervangen, aangezien hij geen onderhoud vereist. Bovendien is een gelijkrichter in de regel — vooral als men hoge spanningen nodig heeft — veel kleiner van volume en gewicht, en dus ook beter transportabel. Indien echter de gelijkspanning bijzonder constant moet zijn, heeft een gelijkrichter waarin tot dit doel geen maatregelen zijn genomen, het nadeel dat de gelijkspanning even grote relatieve schommelingen vertoont als de wisselspanning van het net waarop de gelijkrichter is aangesloten. Hierbij komt nog, dat de inwendige weerstand van zulk een „gewone" gelijkrichter meestal hoger is dan die van een batterij van vergelijkbaar vermogen. De klemspanning van de gelijkrichter zal dus gewoonlijk sterker met de belasting variëren dan die van de batterij.

Sinds geruime tijd zijn gestabiliseerde gelijkrichters bekend, die aan deze gebreken tegemoetkomen. Zij zijn voorzien van een regelinrichting, die er voor zorgt dat bij variërende netspanning en/of variërende belasting de klemspanning constant, of nagenoeg constant blijft — veel beter dan het geval is bij een batterij met veranderlijke belasting. Een goede 10 jaar geleden reeds zijn in dit tijdschrift schakelingen besproken, waarmee dit doel wordt bereikt [1]). De grondslag ervan moge met behulp van *fig. 1* worden verduidelijkt.

In deze figuur stelt R een gelijkrichter met afvlakfilter voor. De klemspanning V_i is afhankelijk van de netspanning en van de belastingstroom I. De regelinrichting bestaat uit een triode T (voortaan regelbuis genoemd), die bij wijze van regelbare weerstand in serie met de belasting in de positieve gelijkstroomleiding is opgenomen. Een batterij, met een spanning V_B ongeveer gelijk aan de gewenste uitgangspanning V_0, is tussen het rooster van de regelbuis en de negatieve pool geschakeld, met een zodanige polariteit dat het verschil $V_B - V_0$ als roosterspanning fungeert.

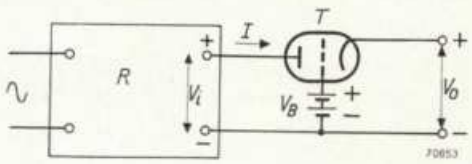

Fig. 1. Schakeling voor het verkrijgen van een gestabiliseerde gelijkspanning V_0. R gelijkrichter met afvlakfilter, met niet-gestabiliseerde spanning V_i. T regelbuis. I gelijkstroom. V_B ($\approx V_0$) is een ter vergelijking dienende constante spanning, afkomstig van bijv. een batterij.

De werking is in het kort als volgt. De spanning V_0 zal zich instellen op een waarde die iets hoger is dan V_B, en wel zo dat het rooster ten opzichte van de kathode juist die negatieve spanning krijgt die de regelbuis nodig heeft om de gevraagde stroom I door te laten. Een verhoging van V_0 maakt het rooster sterker negatief, een verlaging maakt het minder sterk negatief. Iedere verandering van V_0 — hoe ook ontstaan — wordt derhalve tegengewerkt. Een eenvoudige berekening (zie het in [1]) geciteerde artikel) toont aan dat de verzwakkingsfactor a — de verhouding van de relatieve verandering van V_i tot die van V_0 — ten naastebij gelijk is aan de versterkingsfactor μ van de regelbuis. μ kan bijv. de waarde 20 hebben.

Iets dergelijks geldt voor de inwendige weerstand — de grootheid die aangeeft hoeveel V_0 verandert bij een bepaalde wijziging van de stroomsterkte. Zoals in het in [1]) aangehaalde artikel werd afgeleid, is de inwendige weerstand aan de uitgangsklemmen ongeveer μ maal zo klein als de inwendige weerstand van de gelijkrichter zonder regelinrichting.

Hoe groter de versterkingsfactor μ is, des te minder is de uitgangspanning dus afhankelijk van

*) Laboratoires d'Electronique et de Physique appliquées, Parijs. — De heer Pierre Périlhou, die aan het hoofd stond van het Laboratoire Hyperfréquences van Philips te Parijs, is op 11 April 1950 door een noodlottig ongeval om het leven gekomen. Van hem is het initiatief uitgegaan tot het werk dat het onderwerp van het bovenstaande artikel vormt en dat hij zelf voor een groot deel nog heeft geleid. Dit artikel dateert van na de dood van de heer P. Périlhou.

[1]) H. J. Lindenhovius en H. Rinia, Een gelijkstroomvoedingsapparaat met gestabiliseerde spanning, Philips techn. T. **6**, 54-61, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de ingangspanning èn van de stroom. De versterkingsfactor van triodes is echter tot niet zeer grote waarden beperkt. Teneinde de stabilisatie zeer nauwkeurig te maken, is men dan ook algemeen overgegaan tot het gebruik van een gelijkspanningsversterker (*A*, *fig. 2*), die het verschil tussen de

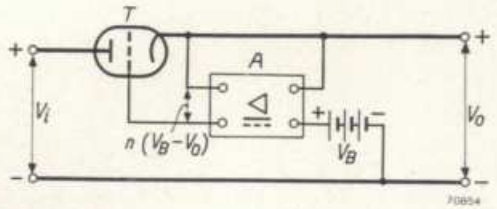

Fig. 2. De schakeling van fig. 1 is uitgebreid met een gelijkspanningsversterker *A*, die het kleine spanningsverschil $V_B - V_0$ met een factor n versterkt.

batterijspanning V_B en de uitgangspanning V_0 met een factor n versterkt. Deze versterkte spanning doet dienst als roosterspanning van de regelbuis. $n\mu$ treedt nu in de plaats van μ; de verzwakkingsfactor wordt dus n maal zo groot, de inwendige weerstand n maal zo klein als zij zouden zijn zonder de versterker. Een waarde van n als bijv. 100 is gemakkelijk te bereiken. Op deze wijze is dus een aanzienlijke vooruitgang te boeken.

Een stap terug moet echter worden gedaan indien de uitgangspanning V_0 hoog is, zo hoog dat het als een te groot bezwaar wordt gevoeld, zoveel batterijen nodig te hebben dat de referentiespanning V_B inderdaad ongeveer gelijk zou zijn aan V_0. Liever zal men dan volstaan met een lagere waarde van V_B en deze lagere waarde vergelijken met een fractie (p) van V_0 (*fig. 3*). Men offert dan in de

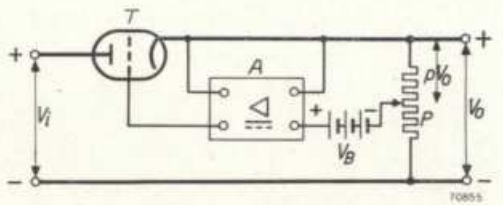

Fig. 3. Als fig. 3, doch V_B is hier ongeveer gelijk aan de spanning pV_0, die door middel van een potentiometer P van V_0 wordt afgetakt.

nauwkeurigheid van de stabilisatie een factor $^1/_p$ op. Om weer de oorspronkelijke nauwkeurigheid te verkrijgen, moet men dus de versterking $^1/_p$ maal zo groot maken.

Door de spanning pV_0 te betrekken van een regelbare potentiometer, zoals in fig. 3 is voorgesteld, ontstaat de mogelijkheid, de uitgangspanning V_0 continu variabel te maken: V_0 zal zich immers steeds zo instellen dat pV_0 ten naastebij gelijk is aan V_B. Door p te variëren verandert men dus V_0. (In principe kan men dit doel ook bereiken door V_B te variëren. Voor een continue regeling zou dan echter over althans een gedeelte van de batterij een potentiometer moeten worden geschakeld, welk gedeelte dan voortdurend stroom zou leveren en zich dus zou ontladen. Vooral bij gebruik van droge batterijen is dit geen aanbevelenswaardige methode. Men merke op, dat in de fig. 1, 2 en 3 de batterij stroomloos is.)

Met deze recapitulatie van het beginsel waarop de bedoelde methode van spanningstabilisatie berust, willen wij hier volstaan. In het aangehaalde artikel [1]) vindt men een nadere uitwerking met varianten beschreven, alsmede de uitvoering van een gestabiliseerde gelijkrichter voor 300 V, 100 mA.

Bijzondere gevallen kunnen nopen tot het zoeken van speciale oplossingen. Is bijv. de gelijkspanning bijzonder hoog en de gelijkstroom zeer klein — de weerstand van de belasting dus buitengewoon hoog —, dan kunnen parasitaire capaciteiten een storende werking uitoefenen. Over een oplossing voor zo'n geval (versnelspanning voor een electronenmicroscoop, ten bedrage van 50 tot 100 kV, bij een stroomverbruik van een fractie van een mA) is in dit tijdschrift al een artikel verschenen [2]). In het onderstaande wordt een ander bijzonder geval beschreven, namelijk dat van een gelijkspanningsbron die nodig was voor laboratoriumwerk op het gebied van decimeter- en centimetergolven. De voor het opwekken van deze golven gebruikte inhaalbuizen hebben de eigenschap dat de frequentie afhankelijk is van de grootte der spanning waarmee de buis wordt gevoed. Daar de frequentie zeer constant moet zijn, dienen de variaties in de voedingspanning tot uiterst kleine waarden te worden beperkt. Het bijzondere van dit geval ligt hoofdzakelijk in de versterkerschakeling, die wegens de hoge gelijkspanning afwijkt van de gebruikelijke schakelingen.

Voornaamste eisen waaraan de gelijkrichter moet voldoen

Van de bedoelde gestabiliseerde gelijkspanningsbron wordt in hoofdzaak het volgende verlangd:

1) Gelijkspanning instelbaar op iedere waarde tussen 900 en 5000 V.
2) Gelijkstroom max. 50 mA.
3) Relatieve schommelingen in de gelijkspanning ten minste 1000 maal zo klein als die in de netspanning, welke tot 10% van de nominale waarde kan afwijken.

---

[2]) A. C. van Dorsten, Philips techn. T. **10**, 137-143, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

4) Bij 5000 V mag een stroomverandering van 50 mA geen spanningsverandering groter dan 0,5 V (0,01%) tot gevolg hebben; met andere woorden: de inwendige weerstand (voor gelijkstroom) moet kleiner zijn dan 10 Ω.
5) De inwendige impedantie voor frequenties tot enige honderden kHz mag niet groter zijn dan 20 Ω (bij 5000 V).
6) Bij 5000 V mogen de ruis- en de rimpelspanning tezamen niet meer bedragen dan 10 mV.

Hoe aan deze eisen is voldaan, zal blijken uit het volgende.

Beschrijving van de gestabiliseerde gelijkrichter 5000 V, 50 mA

Fig. 4 geeft de hoofdzaken van het schema weer. Het regelgedeelte komt overeen met fig. 3. De eigenlijke gelijkrichter bestaat uit een transformator Tr_1, twee gelijkrichtbuizen en een afvlakfilter.

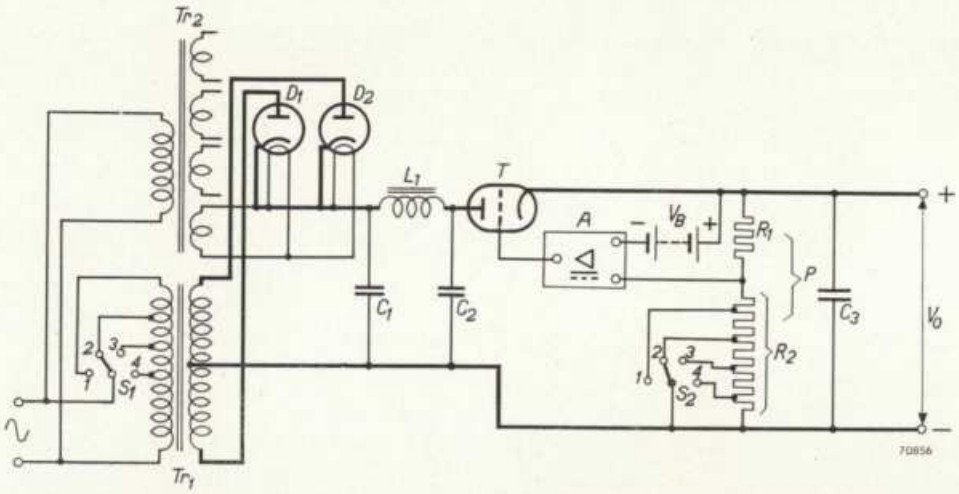

Fig. 4. Principeschema van de gestabiliseerde gelijkrichter voor 5000 V, 50 mA. Tr_1 hoogspanningstransformator. S_1 aftakschakelaar, waarmee de secundaire spanning van Tr_1 op vier waarden kan worden ingesteld. Tr_2 gloeistroomtransformator. D_1, D_2 diodes. C_1-L_1-C_2 afvlakfilter. P potentiometer, bestaande uit een vaste weerstand R_1 en een door middel van een schakelaar S_2 (gekoppeld met S_1) variabele weerstand R_2. C_3 uitgangscondensator. V_B, A en T: als in vorige figuren.

Als regelbuis is gekozen de zendtriode TB 2,5/300 [3]). Op de inrichting van de versterker komen wij aanstonds nog terug.

Daar de uitgangspanning 5000 V moet kunnen bedragen en in de regelbuis een spanningsverlies van ongeveer 1000 V optreedt, moet de spanning V_i aan de uitgang van het afvlakfilter ten minste 6000 V kunnen zijn. Behalve de gevraagde gelijkstroom van max. 50 mA moet de gelijkrichter nog ongeveer 15 mA extra kunnen leveren, voor voeding van de versterker, de potentiometer P (en nog andere weerstanden, waarvan het doel straks zal blijken) en een over de uitgangsklemmen geschakelde voltmeter.

De gewenste instelbaarheid op iedere spanning tussen 900 en 5000 V is verkregen door een combinatie van regelingen in grote en kleine stappen en een continue regeling. De grove regeling komt tot stand met behulp van een schakelaar S_2 (fig. 4), met behulp waarvan een weerstand R_2 in stappen kan worden gevarieerd. R_2 en een vaste weerstand R_1 vormen samen de potentiometer P. Bij het verzetten van S_2 wijzigt men dus de fractie p die van de spanning V_0 wordt afgetakt, en daarmee — aangezien pV_0 steeds ongeveer gelijk is aan de constante referentiespanning V_B (ongeveer 300 V) — de spanning V_0 zelf.

Teneinde te voorkomen dat, wanneer V_0 laag moet zijn, bijv. 1000 V, de regelbuis een spanningsverschil van enige kV zou moeten opnemen, wordt tegelijk met het verzetten van S_2 de secundaire spanning van de transformator Tr_1 veranderd. Dit gebeurt met een schakelaar S_1, die met S_2 is gekoppeld. In de vier standen van deze schakelaars ligt V_0 tussen de volgende grenzen:

S_1 en S_2 in stand *1* ... V_0 tussen 900 en 2100 V,
S_1 en S_2 in stand *2* ... V_0 tussen 1900 en 3100 V,
S_1 en S_2 in stand *3* ... V_0 tussen 2900 en 4100 V,
S_1 en S_2 in stand *4* ... V_0 tussen 3900 en 5100 V.

Naar aanstonds zal blijken, is de toestand in werkelijkheid ingewikkelder, daar bij het verzetten van S_1 en S_2 niet slechts één doch drie weerstanden moeten worden gewijzigd.

[3]) Beschreven in Philips techn. T. **10**, 273-281, 1948, in het bijzonder op blz. 278-280.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De regeling in kleine stappen (200 V) en de continue regeling (over een gebied van ruim 200 V) komen tot stand met behulp van fijnere aftakkingen op de weerstand R_2, resp. continue variatie van een gedeelte van R_2. Deze beide regelwijzen zijn in fig. 4 niet weergegeven.

De versterker

Hoe groot moet de versterking n van de versterker A zijn opdat de relatieve netspanningschommelingen 1000 maal verkleind in de gelijkspanning V_0 tot uiting komen?

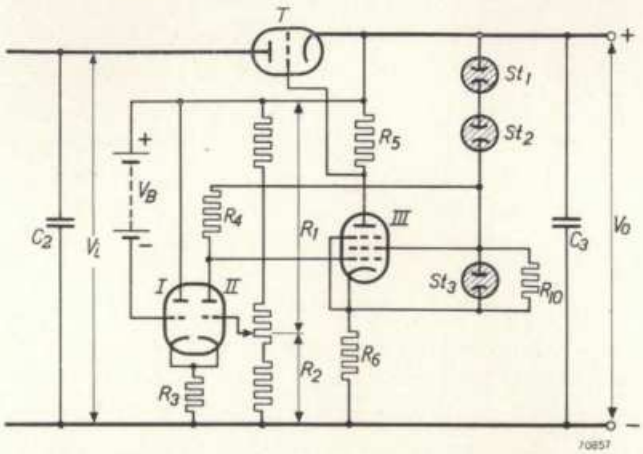

Fig. 5. Enige details van de gelijkspanningsversterker A in fig. 4. De helft I van een dubbele triode ECC 40 werkt als „kathodevolger", de helft II is de eerste versterkbuis. De tweede buis, III, is een penthode EF 42. R_3 en R_6 kathodeweerstanden. R_4 en R_5 anodeweerstanden. St_1, St_2 en St_3 zijn stabiliseerbuizen type 85 A1, die de triode II van anodespanning en de penthode III van schermroosterspanning voorzien. De weerstand R_{10} komt later ter sprake (fig. 13). Overige letters als in fig. 4.

We hebben gezien, dat $n\mu$ gelijk aan de gewenste verzwakkingsfactor a moet zijn indien de batterijspanning gelijk aan V_0 wordt gekozen, maar dat bij lagere batterijspanning een $^1/_p = {}^{V_0}/_{V_B}$ maal zo grote versterking nodig is. Hieraan moet nog een factor $^{V_i}/_{V_0}$ worden toegevoegd, om in rekening te brengen dat een bepaalde verandering van V_i een $^{V_i}/_{V_0}$ maal zo groot percentage van V_0 uitmaakt als van V_i. Dus

$$n\mu = a\,\frac{1}{p}\,\frac{V_i}{V_0} = a\,\frac{V_i}{V_B}.$$

Met $a = 1000$, $V_i = 5000 + 1000 = 6000$ V en $V_B = 300$ V volgt hieruit:

$$n\mu = 20\,000.$$

Daar de versterkingsfactor μ van de triode TB 2,5/300 de waarde 20 heeft, moet $n = 1000$ zijn.

Deze waarde kan niet worden bereikt met één trap versterking. Daarom zijn twee trappen gebruikt; deze leveren een 3000-voudige versterking, zodat aan de eis $a =$ ten minste 1000 ruimschoots is voldaan.

De eerste trap (*fig. 5*) bevat een triode (de helft II van een dubbele triode ECC 40), de tweede een penthode (EF 42); zij versterken 25×, resp. 120×. De andere helft (I) van de buis ECC 40 doet dienst in een voortrap, die geen versterking levert doch door welker gebruik bepaalde moeilijkheden worden vermeden.

Om V_B constant te doen blijven, moet men de batterij zo schakelen dat er geen stroom door loopt, dus in serie met het rooster van een buis. Deze buis zou de eerste buis van de versterker kunnen zijn — geschakeld volgens *fig. 6a* — indien de spanning V_0 niet meer bedroeg dan een paar honderd volt. Is echter V_0 veel hoger, dan wordt het moeilijk, een gelijkspanningskoppeling tot stand te brengen tussen de eerste buis, waarvan de electrodes zich ongeveer op de potentiaal van de negatieve pool bevinden, en de tweede versterkbuis, die de roosterspanning voor de regelbuis moet leveren en zich dus ongeveer op de potentiaal van de positieve pool bevindt.

Deze moeilijkheid vervalt indien men te werk gaat volgens fig. 6*b*. Hier is ook de eerste buis geplaatst aan de kant van de positieve pool. Het onderste gedeelte van de potentiometer P fungeert nu echter als kathodeweerstand, die een zekere mate van tegenkoppeling introduceert en dus de versterking verkleint. Bij hoge spanning V_0 is deze weerstand zo groot dat de versterking van de eerste buis tot ongeveer 1 wordt teruggebracht. Er zijn dan nog twee trappen nodig om de gewenste versterking van ten minste 1000 te verkrijgen.

Bij de gekozen oplossing (fig. 5) heeft men eveneens een „voortrap", die niet versterkt, gevolgd door twee trappen die wel versterken, met dit verschil ten opzichte van fig. 6*b* echter, dat de twee helften van de buis ECC 40 een zg. compensator van Miller vormen. Deze heeft de eigenschap

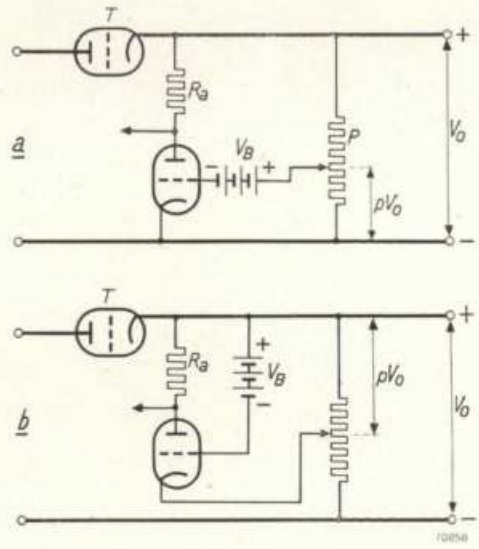

Fig. 6. *a*) Schakeling van de eerste buis van de versterker A (fig. 4), welke schakeling in de practijk alleen bruikbaar is als V_0 niet hoger is dan een paar honderd volt. *b*) Hier bevindt zich de eerste versterkbuis aan de kant van de positieve pool. Nu fungeert echter het onderste gedeelte van de potentiometer P als kathodeweerstand, hetgeen een tegenkoppeling doet ontstaan, die zo sterk kan zijn dat de versterking van deze trap tot ongeveer 1 wordt gereduceerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dat veranderingen in de emissie van de kathodes (bijv. als gevolg van schommelingen in de gloeistroom, die met de netspanning mee varieert) verregaand worden gecompenseerd [4]). Hieraan is het te danken, dat maatregelen om de gloeistroom constant te houden overbodig zijn.

De helft *I* van de buis ECC 40 werkt als „kathodevolger": de potentiaal van de kathode volgt die van het rooster, dwz. ze volgt — via de batterij — de potentiaal V_0. Neemt V_0 bijv. toe, dan gaan de kathodes van de ECC 40 in potentiaal even veel omhoog, de roosterpotentiaal van *II* daarentegen neemt slechts met een kleiner bedrag toe. De anode van *II* en het stuurrooster van de buis EF 42 komen dus op hogere potentiaal, de stroom door de anodeweerstand R_5 neemt toe, de roosterspanning van de regelbuis wordt sterker negatief, en dit laatste werkt de onderstelde toeneming van V_0 tegen. Men ziet dus, dat variaties van V_0 de roosterspanning van de regelbuis in de goede richting doen veranderen.

De uiterste waarden die deze roosterspanning moet kunnen aannemen, zijn —7 en —170 V. Tussen overeenkomstige grenzen moet dus de anodestroom van de buis EF 42 kunnen variëren.

De versterker wordt gevoed van de gelijkspanningsklemmen uit. Drie in serie geschakelde stabiliseerbuizen type 85A1 [5]) zorgen voor constante voedingspanningen voor de versterkbuizen.

De schakeling is zodanig dat geen enkel punt van de eigenlijke versterker een groot potentiaalverschil ten opzichte van de positieve pool vertoont: de kathodes van de ECC 40 hebben ongeveer —300 V, de kathode van de EF 42 heeft —255 V ten opzichte van de positieve pool. Dit vereenvoudigt de montage. Het overige deel van V_0 wordt opgenomen in de weerstanden R_3 resp. R_6 (fig. 5).

Instelbaarheid van de gelijkspanning

Wij zeiden reeds dat de gelijkspanning kan worden ingesteld met grote en kleine stappen èn continu, en dat de grove regeling het gebied van 900 tot 5100 V beslaat in vier, gedeeltelijk over elkaar heen vallende, stappen van 1200 V. Daartoe zijn de schakelaars S_1 en S_2 aanwezig (fig. 4), waarmee vier waarden van de secundaire spanning van de transformator Tr_1, resp. vier potentiometerverhoudingen p, kunnen worden ingesteld. Tegelijk met p (de weerstand R_2 dus) moeten op overeenkomstige wijze de weerstanden R_3 en R_6 worden gewijzigd. Te dien einde zijn met de schakelaars S_1 en S_2 gekoppeld de schakelaars S_3 en S_4 (*fig. 7*), die R_3 resp. R_6 zodanig variëren, dat in elk van deze weerstanden de juiste stroom loopt (4,45 mA, welke waarde ook geldt voor R_2). Een vijfde schakelaar, S_5, ook met S_1 en S_2 gekoppeld, geeft de voltmeter, die over de uitgangsklemmen is geschakeld, in de standen *1* en *2* een meetgebied tot 4000 V, en in de standen *3* en *4* tot 6000 V.

Een tweede stel gekoppelde schakelaars, S_6, S_7 en S_8, veroorlooft een instelling van de spanning in zes stappen van 200 V.

Bovendien nog kunnen R_3, R_2 en R_6 door middel van onderling gekoppelde continu regelbare weerstanden zo worden gevarieerd dat een geleidelijke variatiemogelijkheid over een gebied van ruim 200 V wordt verkregen. Op deze wijze kan men dus iedere gelijkspanningswaarde tussen 900 en 5100 V instellen.

Maatregelen tegen oscilleren

Zoals uit fig. 2 en volgende is te zien, vormen de versterker en de regelbuis een gesloten circuit. Onder bepaalde omstandigheden kan dit aan het oscilleren gaan. Zo zou bij het inschakelen van de hoogspanningstransformator de volgende ongewenste toestand kunnen ontstaan. Vóór het inschakelen is R_5 (fig. 5) nog stroomloos, de roosterspanning van de regelbuis dus nul en de weerstand van deze buis (tussen anode en kathode) laag. Dientengevolge zal bij het inschakelen de gelijkspanning V_0 snel oplopen, vooral indien de belasting inductief is. Ook de stroom door R_5 neemt dan toe, doch, als in de versterker een zekere vertraging optreedt, minder snel. Het kan dan gebeuren, dat wanneer V_0 de gewenste waarde heeft bereikt, de roosterspanning (over R_5) nog niet aan de daarmee corresponderende waarde toe is. V_0 schiet dan over de juiste waarde heen, tot de roosterspanning zo ver negatief is geworden dat de regelbuis een hoge weerstand vormt. V_0 daalt dan, maar, als gevolg van de vertraging in de versterker, grijpt de spanning over R_5 weer te laat in, zodat V_0 te ver daalt, enz. In plaats van de evenwichtswaarde te bereiken, blijft V_0 er omheen schommelen.

Het zou hier te ver voeren, uitvoerig in te gaan op de maatregelen die tegen dit oscilleren zijn genomen. Wij zullen ze hier slechts aanstippen.

Er is gestreefd naar een zo gering mogelijke vertraging, d.i. zo gering mogelijke fazeverschuiving in de versterker. Vandaar dat koppelcondensatoren en lekweerstanden zijn vermeden. Daardoor wordt de frequentie waarmee het oscilleren eventueel zou optreden, verschoven naar vrij hoge waarden (boven 15 000 Hz). In serie met de regelbuis is een smoorspoel geschakeld (L_2, fig. 7), die bij deze

[4]) S. E. Miller, Sensitive d.c. amplifier with a.c. operation, Electronics **14**, 27-31 en 105-109, Nov. 1941.

[5]) T. Jurriaanse, Een spanningsstabiliseerbuis voor zeer constante spanning, Philips techn. T. **8**, 273-278, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

frequentie een hoge impedantie heeft. (Teneinde te voorkomen dat deze smoorspoel de inwendige impedantie te veel zou vergroten, is er een weerstand van 10 000 Ω aan parallelgeschakeld.) Een condensator C_3 over de uitgangsklemmen belet het optreden van discontinue veranderingen van V_0 (en zorgt tevens voor een lage inwendige impedantie bij hoge frequenties, namelijk steeds minder dan 20 Ω).

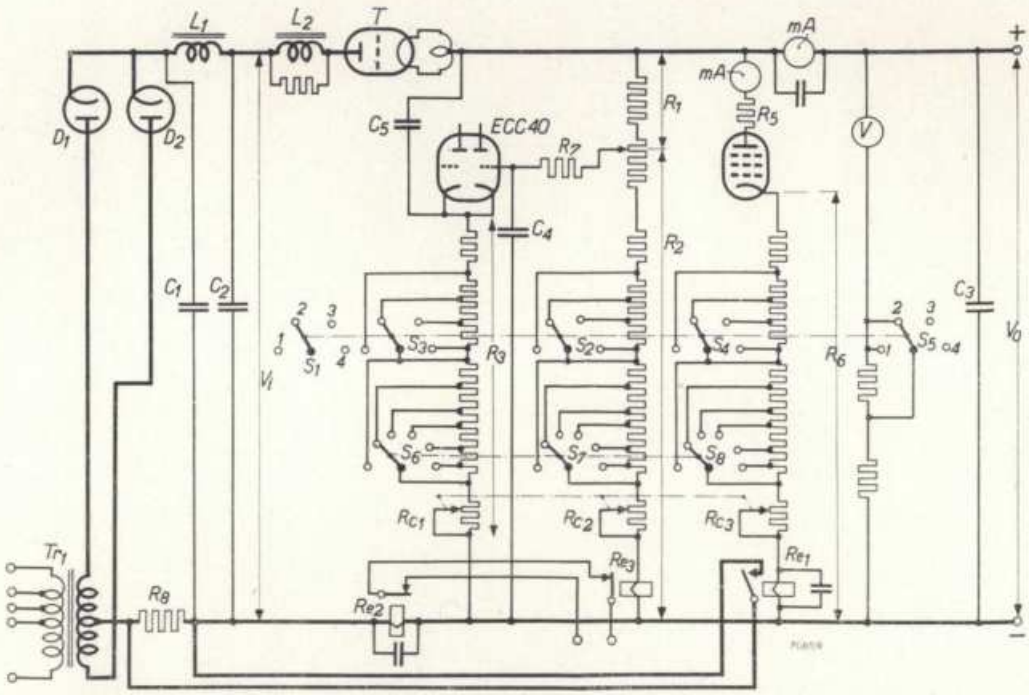

Fig. 7. Door middel van de onderling gekoppelde aftakschakelaars S_1, S_2 (vgl. fig. 4), S_3 en S_4 kan de spanning V_0 in vier stappen van 1200 V worden ingesteld op waarden tussen 900 en 5100 V. Iedere stap is onderverdeeld in zes stappen van 200 V, instelbaar met de drie gekoppelde schakelaars S_6-S_7-S_8. Binnen elk van deze kleine stappen is V_0 continu regelbaar met behulp van de drie gekoppelde weerstanden R_{c1}-R_{c2}-R_{c3}. Schakelaar S_5 (gekoppeld met S_1-S_2-S_3-S_4) geeft de voltmeter V in de standen *1* en *2* een meetgebied tot 4000 V, in de standen *3* en *4* tot 6000 V.

Maatregelen tegen oscilleren: smoorspoel L_2 (8 H), uitgangscondensator C_3 (0,2 μF), ontkoppelketen R_7-C_4.

Beveiligingsmaatregelen. Tegen kortstondige te grote stroom door de gelijkrichtbuizen bij het inschakelen: weerstand R_8 (naderhand kortgesloten door relais Re_1); tegen overbelasting: relais Re_2; tegen te hoge spanning: relais Re_3. Indien Re_2 of Re_3 zijn contact opent, wordt de hoogspanningstransformator afgeschakeld (zie fig. 8).

Overige letters als in vorige figuren.

De potentiometer P bestaat uit van draad gewonden weerstanden. Deze zijn niet vrij van zelfinductie. Daardoor kan deze potentiometer een fazeverschuiving teweegbrengen die het oscilleren in de hand werkt. Een ontkoppeling R_7-C_4 echter (fig. 7) belet, dat een wisselspanningscomponent in de op P afgetakte spanning het rooster van de triode *II* beereikt.

Door dit samenstel van maatregelen wordt in alle practische gevallen de neiging tot oscilleren in voldoende mate ondrdrukt.

De afvlakking

De regelaar zorgt er niet alleen voor dat de toevallige, maar ook dat de regelmatige fluctuatie in de ingangspanning — de rimpel — verzwakt in de uitgangspanning tot uiting komt. De condensatoren C_4 en C_5 (fig. 7) delen namelijk een eventuele wisselspanningscomponent van de uitgangspanning zonder fazeverschuiving mede aan het rooster resp. de kathode van de triode *II*, met zodanig teken dat de wisselspanning grotendeels wordt gecompenseerd. Er mag dus een vrij grote rimpelspanning aan de uitgang van het afvlakfilter aanwezig zijn; met andere woorden: aan dit filter (C_1-L_1-C_2, fig. 4 en 7) worden geen hoge eisen gesteld. Met de door ons gebruikte waarden ($C_1 = C_2 = 0{,}5$ μF, $L_1 = 40$ H) is, bij $V_0 = 5000$ V en volle belasting, de rimpelspanning over C_2 ongeveer 30 V. Daarmee correspondeert een 3000 maal zo kleine rimpelspanning (inclusief ruisspanning) aan de uitgang (10 mV).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beveiligingsmaatregelen

Gelijkrichtbuizen met een oxydekathode lijden schade wanneer de anodestroom wordt ingeschakeld voordat de kathode warm genoeg is. Veelal wordt in gelijkrichters met zulke buizen dan ook een schakeling toegepast die deze mogelijkheid uitsluit. Ook hier is dit het geval. De bedoelde schakeling is weergegeven in *fig. 8*, die laat zien hoe een bimetaal er voor zorgt dat pas na een zekere tijd (45 s) na het inschakelen van de gloeistroomtransformator de hoogspanningstransformator in werking kan worden gesteld. Voor bijzonderheden verwijzen wij naar het onderschrift van de figuur.

Als tweede maatregel om de kathodes te sparen

Bijzonderheden van de uitvoering

Het uiterlijk van de gelijkrichter is te zien in *fig. 9* en het inwendige in *fig. 10*. Enige bijzonderheden vindt men vermeld in de onderschriften. Wij willen daaraan nog het volgende toevoegen aangaande warmte- en isolatiekwesties.

Gaten in de bodem en de zijwanden, alsmede een spleet onder het deksel, doen een goede ventilatie door de kast ontstaan. Niettemin leek het wenselijk, de voornaamste warmtebron, de regelbuis TB 2,5/300, zodanig op te stellen dat ze zo weinig mogelijk „buren" heeft — dus in een hoek van de kast (fig. 10) — en de warmtestraling af te schermen door platen van gepolijst nikkel.

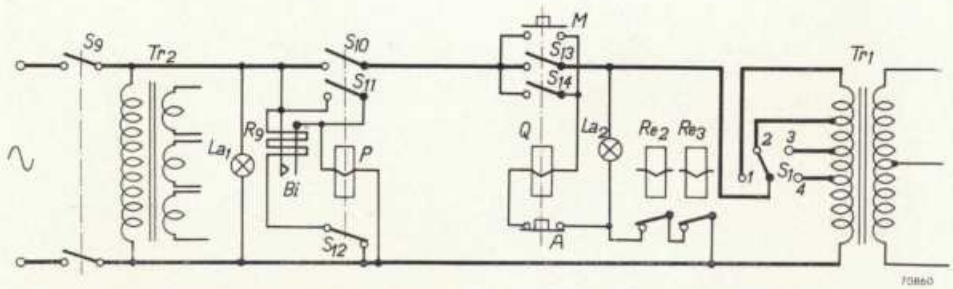

Fig. 8. Schakeling die automatisch verhindert dat stroom door de gelijkrichtbuizen loopt vóórdat de oxydekathodes warm genoeg zijn. Door middel van de hoofdschakelaar S_9 wordt de gloeistroomtransformator Tr_2 aangesloten op het net. Tegelijk gaat er stroom lopen door een weerstanddraad R_9, die is gewikkeld om een bimetaal *Bi*. Dit gaat zich onder invloed van de warmte-ontwikkeling krommen en sluit na 45 s een contact. Daardoor wordt de magneetspoel P van een electromagnetische schakelaar bekrachtigd, dwz. het hoofdcontact S_{10} en het hulpcontact S_{11} worden gesloten en het hulpcontact S_{12} geopend. S_{12} verbreekt de stroom door R_9; het bimetaal koelt af, opent zijn contact (dat inmiddels door S_{11} is overbrugd, zodat P bekrachtigd blijft) en is na enige tijd opnieuw in staat een vertraagde inschakeling tot stand te brengen. Pas nadat S_{10} is gesloten, heeft drukken op de knop M tot effect dat de spoel Q van een tweede electromagnetische schakelaar wordt bekrachtigd; het hoofdcontact S_{13} hiervan schakelt de hoogspanningstransformator Tr_1 in. Na loslaten van M blijft Q bekrachtigd via het hulpcontact S_{14}.

De hoogspanning kan worden uitgeschakeld zonder de gloeistroom mede uit te schakelen, hetzij met de hand (door drukken op knop A), hetzij automatisch (door relais Re_2 of Re_3, vgl. fig. 7).

La_1, La_2 signaallampjes.

is vóór het afvlakfilter een weerstand R_8 aangebracht (fig. 7). Deze voorkomt dat de gelijkrichtbuizen onmiddellijk na het inschakelen van de hoogspanningstransformator — wanneer de afvlakcondensatoren nog niet geladen zijn — even een excessief grote stroom zouden moeten doorlaten. Enige tijd na het inschakelen, wanneer de spanning V_0 zo ver is opgelopen dat een relais Re_1 zijn anker aantrekt, wordt R_8 kortgesloten.

Zodra de geleverde gelijkstroom te groot wordt, opent een relais Re_2 (fig. 7) zijn contact, wat tot gevolg heeft dat de hoogspanningstransformator wordt uitgeschakeld (fig. 8). Indien, als gevolg van een defect in de regelaar, de spanning V_0 te hoog zou worden, verbreekt een relais Re_3 (fig. 7), door welks spoel een met V_0 evenredige stroom loopt, zijn contact. Ook dit heeft tot gevolg dat de hoogspanningstransformator wordt uitgeschakeld.

De referentiespanning wordt geleverd door drie in serie geschakelde droge batterijen van 103 V nominale spanning, van een courant type. Deze batterijen behouden jarenlang hun spanning en hebben een zeer geringe temperatuurcoëfficient [6]). Ze bevinden zich in een metalen kastje (*B*, fig. 10), dat van binnen is bekleed met isolatieplaat. De negatieve pool is uitgevoerd door middel van een kabel met een zeer deugdelijke isolatie (polytheen).

Als materiaal om de versterker, de houder van de regelbuis, enz., geïsoleerd in de kast te bevestigen, is gebruik gemaakt van „Plexiglas".

[6]) Met enige opoffering van nauwkeurigheid is het mogelijk, het gebruik van batterijen te vermijden door de referentiespanning te ontlenen aan enige in serie geschakelde stabiliseerbuizen type 85 A1 of 85 A2 (zie het in [5]) aangehaalde artikel). Deze veranderen tijdens de levensduur max. 0,5% in spanning en hebben een temperatuurcoëfficient van omstreeks —3 mV/°C. In beide opzichten benaderen zij het gebruikte batterijtype vrij dicht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 9

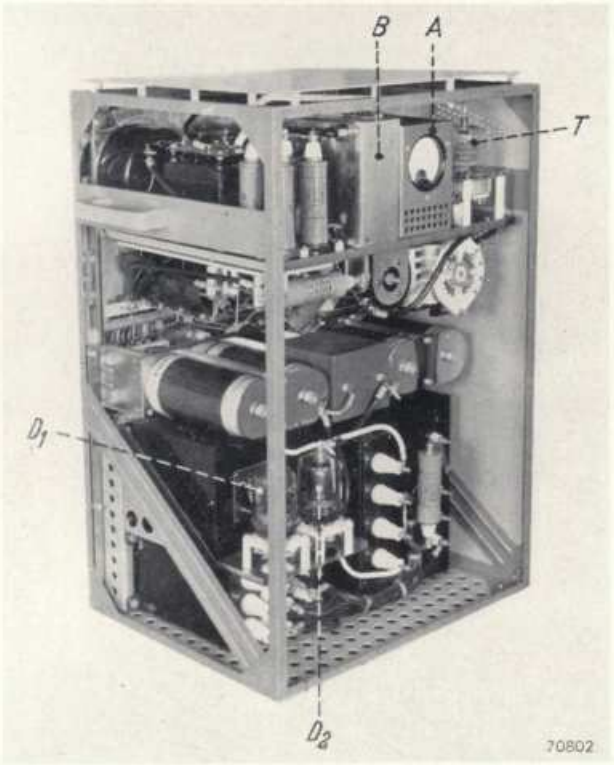

Fig. 10

Fig. 9. Voorzijde van de gelijkrichter. Van links naar rechts en van boven naar beneden: voltmeter voor de gelijkspanning, milliampèremeter voor de gelijkstroom, knoppen voor het instellen van de gelijkspanning (grof, fijn, continu), signaallampje, drukknoppen voor het bedienen van S_9, resp. van S_{13}-S_{14} (fig. 8), tweede signaallampje, smeltveiligheden aan de wisselstroomzijde (de ene kan in twee standen worden gezet, al naar gelang de netspanning 110 of 220 V is), hoogspanningskabel, snoer voor aansluiting op het net. Verbruik bij volle belasting: 700 W. Afmetingen: grondvlak 445 mm × 350 mm, hoogte 790 mm. Gewicht 80 kg.

Fig. 10. De gelijkrichter van achteren gezien (twee wanden weggenomen). *A* versterker (met milliampèremeter in de anodeketen van de buis EF 42). *B* batterijenkast. *T* regelbuis TB 2,5/300. D_1, D_2 diodes.

Weerstanden waarvan de waarde er nauwkeurig op aankomt, zoals R_1, R_2, R_3 en R_6 (fig. 7), zijn gemaakt van constantaandraad. Ter vermijding van lekstromen is dit gewikkeld op cylinders van kwarts. De wikkeling is zodanig uitgevoerd dat de spanningen die er door eventuele strooivelden in worden geïnduceerd, elkaar opheffen.

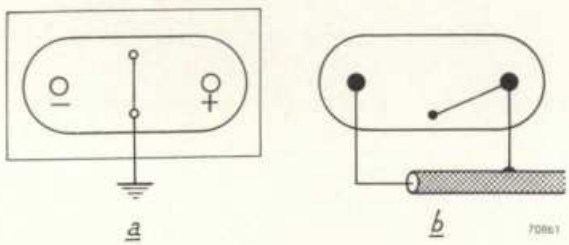

Fig. 11. *a*) Contactbussen op de gelijkrichter, *b*) bijbehorende steker aan de hoogspanningskabel. In de ene stand van de contrasteker komen de negatieve pool en de buitengeleider aan aarde te liggen en de positieve pool aan de ader, na 180° omdraaien van de steker worden de positieve pool en de buitengeleider verbonden met aarde, en de negatieve pool met de ader.

Fig. 11 laat zien hoe een bijzondere steker aan de hoogspanningskabel bewerkstelligt dat naar keuze òf de positieve pool òf de negatieve pool wordt geaard (alle isolaties zijn op beide gevallen berekend), en dat daarbij automatisch de buitengeleider van de kabel aan aarde komt te liggen en de ader aan de niet-geaarde pool.

De overgangstoestand na het inschakelen

Na het inschakelen van de hoogspanningstransformator verkeert de versterker aanvankelijk in een abnormale toestand. De uitgangspanning V_0 zal immers geleidelijk van 0 af toenemen, en zolang ze nog niet de waarde heeft bereikt waarbij de stabiliseerbuizen ontsteken, zijn deze laatste stroomloos en kan er dus geen anodestroom lopen door de buis *II* (fig. 5) en evenmin — daar de schermroosterspanning nul is — door de buis *III*.

Deze abnormale toestand brengt het gevaar mee dat zich een evenwichtstoestand instelt waarbij V_0 in het geheel niet de gewenste waarde aanneemt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hoe zulk een verkeerde evenwichtstoestand kan ontstaan, wordt toegelicht door *fig. 12*. De hierin getekende kromme *1* werd opgenomen door als roosterspanning voor de regelbuis niet de spanning

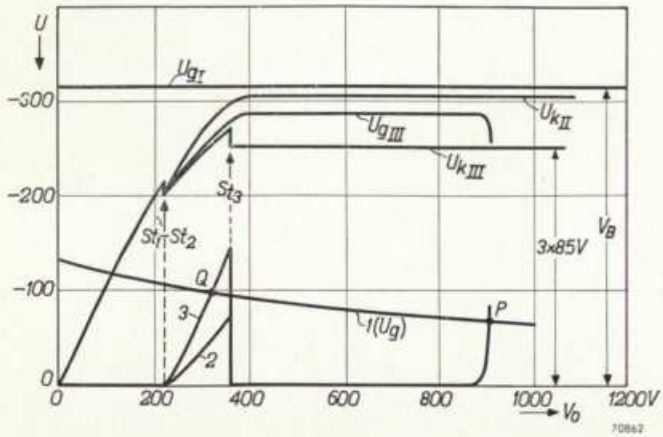

Fig. 12. Kromme *1*: roosterspanning U_g die de regelbuis, bij V_i = 3000 V en een belastingsweerstand R_0 = 18 000 Ω, nodig heeft om de als abscis uitgezette waarden van V_0 te geven. Krommen *2* en *3*: spanning U_{R_5} over de weerstand R_5 (fig. 5), als functie van V_0. *2* snijdt *1* alleen in het punt *P*, waarbij V_0 de gewenste waarde van 900 V heeft. *3* snijdt *1* reeds eerder, in *Q*, waardoor V_0 op een te lage waarde blijft hangen.

De andere krommen geven het verloop van de potentialen $U_{k_{II}}$, $U_{k_{III}}$, $U_{g_I}(=-V_B)$ en $U_{g_{III}}$ (zie fig. 13) als functie van V_0. De pijltjes geven aan, bij welke waarde van V_0 de buizen St_1 en St_2, resp. de buis St_3 ontsteken.

over de anodeweerstand R_5 te nemen (fig. 5), maar een regelbare gelijkspanning U_g uit een onafhankelijke bron [7]). Tussen de uitgangsklemmen was een vaste belastingsweerstand R_0 aangesloten. De ingangspanning V_i werd door bijregelen van de primaire wisselspanning constant gehouden. Kromme *1* in fig. 12 geeft U_g als functie van V_0. Om V_0 bijv. de waarde 900 V te geven, moeten we volgens deze grafiek, bij de gekozen waarden van R_0 en V_i, U_g = —59 V nemen (punt *P*). Vervangen we nu U_g weer door de spanning over R_5, dan moeten we ons afvragen, volgens welk verloop deze spanning U_{R_5} na het inschakelen — wanneer V_0 dus van 0 af toeneemt — zal variëren. Geschiedt dit bijv. volgens kromme *2*, die *1* niet eerder dan in *P* snijdt, dan treedt evenwicht in bij de gewenste waarde van V_0 (900 V). Zou echter U_{R_5} verlopen volgens kromme *3*, die *1* niet alleen snijdt in *P* doch reeds eerder, in een punt *Q*, dan stelt het evenwicht zich in bij *Q*, dwz. V_0 blijft na het inschakelen „hangen" bij een veel te lage waarde. Het is dus van belang, U_{R_5} te kennen als functie van V_0, van V_0 = 0 af.

Dat deze functie ongeveer de gedaante moet hebben van de kromme *2* of *3* in fig. 12, is aan de hand van fig. 5 gemakkelijk in te zien. Zolang V_0 nog niet de waarde heeft bereikt waarbij de in serie geschakelde stabiliseerbuizen St_1 en St_2 ontsteken — dit gebeurt bij ongeveer 210 V — is de penthode, bij gebrek aan schermroosterspanning, stroomloos, en U_{R_5} dus nul. Van het ogenblik af waarop St_1 en St_2 ontsteken, lopen er schermrooster- en anodestroom door de penthode, en anodestroom door de triode *II*. De anodestroom van de penthode wordt in grootte bepaald door de spanning tussen stuurrooster en kathode, dus door het verschil tussen de potentiaal $U_{g_{III}}$ van het stuurrooster en de potentiaal $U_{k_{III}}$ van de kathode. Het verloop van deze potentialen, beide ten opzichte van de positieve pool, als functie van V_0, is in fig. 12 mede voorgesteld. Bereikt V_0 de waarde waarbij ook de derde stabiliseerbuis ontsteekt, dan valt de spanning over deze buis plotseling terug van de ontsteekspanning (100 - 125 V) tot de brandspanning (85 V), het verschil tussen $U_{g_{III}}$ en $U_{k_{III}}$ wordt dus 15 - 40 V groter, dwz. zo groot dat de penthode weer is afgeknepen en U_{R_5} derhalve weer nul wordt.

Waarvoor wij nu moeten zorg dragen, is dat de kromme $U_{R_5} = f(V_0)$ de kromme $U_g = f(V_0)$ niet ontijdig snijdt (fig. 12). Dit komt er dus op neer dat voor het ontsteken van St_3 de spanning U_{R_5} — dus ook de anodestroom van de penthode — voldoende klein moet worden gehouden, dwz. het verschil $U_{g_{III}}$—$U_{k_{III}}$ moet voldoende sterk negatief blijven.

De weerstand R_{10} (fig. 5 en *fig. 13*) is het middel waarmee we op $U_{k_{III}}$ zodanige invloed kunnen uitoefenen dat aan de genoemde voorwaarde wordt voldaan. Uit fig. 13 immers lezen we af, voor het geval dat St_1 en St_2 wel zijn ontstoken (en ieder

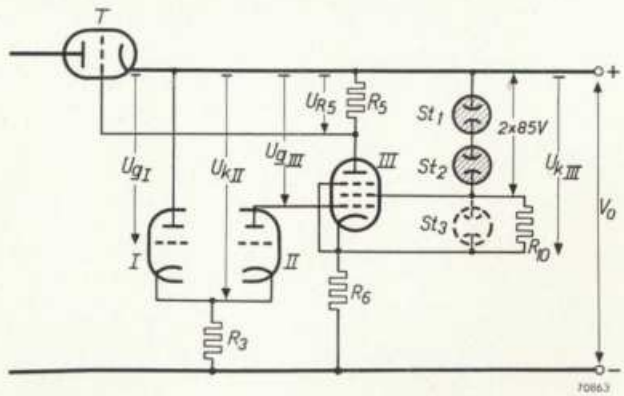

Fig. 13. In deze figuur is ondersteld dat V_0 is opgelopen tot een waarde waarbij St_1 en St_2 zijn ontstoken maar St_3 nog niet. De potentialen U_{g_I}, $U_{k_{II}}$, $U_{k_{III}}$, $U_{g_{III}}$ en U_{R_5} ten opzichte van de positieve pool zijn alle negatief. Men vindt ze als functie van V_0 uitgezet in fig. 12.

Overige letters als in fig. 5.

[7]) Met de letter *U* zijn bedoeld potentialen ten opzichte van de positieve pool, met *V* potentialen ten opzichte van de negatieve pool.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een brandspanning van 85 V hebben), doch St_3 nog niet:

$$-U_{k_{III}} = 170 + \frac{R_{10}}{R_6 + R_{10}} (V_0 - 170).$$

Verkleining van R_{10} heeft derhalve tot gevolg dat $-U_{k_{III}}$ afneemt, dus dat de kathode van buis *III* in potentiaal stijgt. Door R_{10} klein genoeg te kiezen kan men de potentiaal van de kathode in voldoende mate hoger houden dan die van het stuurrooster.

Een onderste grens wordt aan R_{10} gesteld door de voorwaarde dat in de stationnaire toestand de stroom door de buis St_3 niet te klein mag zijn. Voor een goede stabiliserende werking van deze buis is een stroom van ten minste 1 mA nodig. Met eveneens 1 mA kathodestroom door de penthode blijft er van de stroom door R_6, die in de stationnaire toestand 4,45 mA bedraagt, dus ten hoogste 2,45 mA over voor R_{10}. Daaruit volgt, bij 85 V brandspanning van St_3:

$$R_{10} \geqq \frac{85}{2{,}45 \cdot 10^{-3}} = 35\,000\ \Omega\,.$$

Is aan deze voorwaarde voldaan, dan is tevens een ander gevaar dat bij verkleining van R_{10} dreigt op te treden, bezworen, namelijk dat bij het oplopen van V_0 de spanning over R_{10} niet hoog genoeg zou worden om St_3 te doen ontsteken. Gaat men na, welke minimale waarde van R_{10} nodig is voor een zeker ontsteken van St_3, dan vindt men 23 000 Ω.

De hoogste waarde die men R_{10} kan geven zonder dat er aanvankelijk al stroom door de penthode gaat lopen, is 95 000 Ω. Voor R_{10} is gekozen de waarde 50 000 Ω.

Over het verloop van de krommen U_{gI}, U_{kII}, U_{gIII} en U_{kIII} in fig. 12 merken wij nog het volgende op.

De potentiaal U_{gI} van het rooster van de buis *I* (fig. 5), ten opzichte van de positieve pool, is $-V_B$. Er kan pas stroom door deze buis gaan wanneer de kathodepotentiaal U_{kII} de roosterpotentiaal U_{gI} dicht is genaderd. Zolang St_1 en St_2 nog niet zijn ontstoken en derhalve de buis *II* en de weerstand R_3 nog stroomloos zijn, is $U_{kII} = -V_0$ (ook U_{kIII} en U_{gIII} zijn dan $= -V_0$, zie fig. 12). Wanneer St_1 en St_2 ontsteken, bij $V_0 \approx 210$ V, is U_{kII} nog zo ver van U_{gI} verwijderd dat *I* nog steeds stroomloos is.

Zodra St_1 en St_2 ontsteken, gaat er stroom lopen door *II* en R_3. Het spanningsverval over R_3 maakt, dat U_{kII} nu minder snel oploopt dan V_0. Pas bij V_0 in de buurt van 400 V komt *I* in werking: van daar af blijft U_{kII} constant $\approx -V_B$.

Het verschil tussen de anode- en de kathodepotentiaal van *II* wordt in de gegeven omstandigheden niet groter dan circa 15 V. De kromme U_{gIII} (= anodepotentiaal van *II*) loopt dus op kleine afstand evenwijdig aan de kromme U_{kII}.

Na het ontsteken van St_3 blijft $-U_{kIII}$ constant, gelijk aan de som van de drie brandspanningen = 255 V.

Samenvatting. Voor laboratoriumwerk op het gebied van decimeter- en centimetergolven is een gelijkrichter uitgewerkt die een gestabiliseerde spanning geeft, zodat de zendbuizen die uit deze gelijkrichter worden gevoed, een zeer constante frequentie opwekken. De schommelingen in de uitgangspanning zijn, relatief genomen, 3000× zo klein als die in de netspanning. De inwendige weerstand is minder dan 10 Ω voor gelijkstroom en minder dan 20 Ω voor hoogfrequente stroom. Bij 5000 V gelijkspanning is de rimpel- en ruisspanning niet meer dan 10 mV.

Een en ander is bereikt door gebruik te maken van een bekende methode, volgens welke een triode (regelbuis) bij wijze van regelbare weerstand in de gelijkstroomketen is geschakeld. Een fractie van de uitgangspanning wordt vergeleken met een constante spanning; het verschil wordt versterkt door een gelijkspanningsversterker, waarvan de uitgangspanning dienst doet als roosterspanning van de regelbuis. De schakeling van deze versterker, die met de hoge uitgangspanning van de gelijkrichter wordt gevoed, is nogal ongewoon. De versterker bestaat uit twee trappen, die samen 3000× versterken, en een niet versterkende voortrap („kathodevolger"). De referentiespanning wordt geleverd door droge batterijen (300 V). De uitgangspanning kan worden ingesteld tussen 900 en 5000 V, en wel in vier stappen van 1200 V, in zes stappen van 200 V, en continu over een gebied van ruim 200 V. De hoge gelijkspanning en de grote versterking stellen strenge eisen aan de montage en aan de kwaliteit van diverse onderdelen.

Ter sprake komen verschillende beveiligingsmaatregelen en de maatregelen die zijn genomen om oscilleren te voorkomen. Eveneens wordt besproken hoe is voorkomen dat, na het inschakelen, de uitgangspanning op een te lage waarde blijft hangen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

WATERSTOFARME LASSTAVEN

door J. D. FAST.

621.791.753.4

Met het voortschrijden der techniek worden aan de lasverbindingen in metaalconstructies steeds hogere eisen gesteld. Deze hebben geleid tot de ontwikkeling van lasstaven die slechts weinig zuurstof aan het lasmetaal afgeven, maar zonder speciale maatregelen gaat met de afneming van het zuurstofgehalte een, eveneens ongewenste, toeneming van het waterstofgehalte gepaard. Een nieuw type electrode, de zg. waterstofarme lasstaaf, is daarom ontwikkeld.

Invloed van de bekleding van lasstaven op het gasgehalte van het neergesmolten metaal

Het electrisch booglassen geschiedt tegenwoordig in de meeste landen vrijwel uitsluitend met beklede lasstaven, althans voor zover het lassen in lucht plaats vindt. De voornaamste taak van de bekleding is het beschermen van het afsmeltende metaal tegen de inwerking van de zuurstof en de stikstof uit de lucht. Een bijna even belangrijke taak is het ontwikkelen van zoveel gas, dat de druppels die tijdens het lassen aan het uiteinde van de lasstaaf worden gevormd, met grote kracht op het werkstuk worden geblazen, waardoor een vlotte metaalovergang en een goede inbranding (zelfs bij „boven het hoofd" lassen) worden bereikt.

De bekleding van lasstaven bestaat altijd gedeeltelijk uit metaaloxydes. Zouden deze gemakkelijk grote hoeveelheden zuurstof aan het gesmolten metaal kunnen overdragen, dan zou uiteraard het eerstgenoemde voordeel van de bekleding, te weten de bescherming die zij tegen zuurstof (en stikstof) biedt, illusoir worden. Men is er in geslaagd bekledingen te maken die een minimale hoeveelheid zuurstof aan het lasmetaal afgeven, door slechts van zeer stabiele oxydes gebruik te maken en door bovendien reducerende metaalpoeders aan de bekleding toe te voegen. Het zuurstofeuvel steeds effectiever bestrijdende, haalde men echter een nieuw euvel binnen, nl. de opneming van aanmerkelijke hoeveelheden waterstof.

De combinatie van verbindingen waaruit de bekleding van een lasstaaf bestaat, geeft bij verhitting waterdamp af. Deze waterdamp komt in de boogatmosfeer en is tijdens het lassen in aanraking met het gesmolten metaal. Dit heeft een bepaald oplossend vermogen voor waterstof en zuurstof, zodat zich een evenwicht van de volgende aard tracht in te stellen:

$$H_2O \rightleftarrows 2\,[H] + [O] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin duiden de vierkante haken de waterstof en zuurstof in opgeloste toestand in het metaal aan. (Als symbolen zijn H en O en niet H_2 en O_2 gebruikt, omdat waterstof en zuurstof in de atomaire en niet in de moleculaire vorm in het metaal aanwezig zijn.) In de evenwichtstoestand — die van de temperatuur T afhangt — bestaat er, zoals de physische chemie leert, bij benadering een eenvoudig verband tussen de percentages waterstof en zuurstof in het metaal en de dampdruk $p(H_2O)$ van de waterdamp buiten het metaal. Deze relatie is de volgende:

$$\frac{[\%H]^2 \times [\%O]}{p\,(H_2O)} = C\,(T) \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Hieruit volgt, dat des te meer waterstof door het metaal zal worden opgenomen naarmate dit minder zuurstof bevat en naarmate de waterdampdruk groter is [1]).

Bij de verbetering van de bekledingen der electrodes in de zin van een geringere afgifte van zuurstof aan het metaal, stootte men inderdaad spoedig op moeilijkheden, die bleken samen te hangen met het feit dat, bij gelijkblijvend waterdampgehalte van de boogatmosfeer, automatisch meer waterstof door het metaal werd opgenomen. Dit leidde tot verschillende onaangename verschijnselen.

Schadelijke werkingen van waterstof

Waterstof wordt tijdens het lassen in het gesmolten metaal opgenomen. Nu neemt de oplosbaarheid van waterstof in ijzer bij dalende temperatuur af en bij het stolpunt maakt de oplosbaarheid zelfs een flinke sprong omlaag. Het metaal zal dus tijdens de afkoeling een gedeelte van de opgenomen waterstof weer moeten afgeven. Zolang het metaal nog vloeibaar is, kan dit op twee manieren gebeuren: 1) door het vormen van gasbellen in het vloeibare metaal,

[1]) De evenwichtstoestand, waarvoor formule (2) geldt, wordt bij het lassen nooit geheel bereikt. Voor de volgende semi-kwantitatieve beschouwingen zal de formule echter toch zeer bruikbaar blijken te zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

die door de hydrostatische druk naar het oppervlak stijgen; 2) door diffusie van de gasatomen naar buiten, gevolgd door recombinatie aan het oppervlak tot moleculen.

In een vorig artikel in dit tijdschrift [2]) is reeds uitvoerig nagegaan welke rol beide processen bij het lassen spelen. Bij het stollen kan het eerste proces onder bepaalde omstandigheden aanleiding geven tot het ontstaan van poriën in de lasnaad. Tot deze omstandigheden moet bijv. worden gerekend de aanwezigheid van betrekkelijk veel zwavel in het lasmetaal. Voor een nadere uiteenzetting van de werking van zwavel verwijzen wij naar het onder [2]) genoemde artikel.

Nadat het neergesmolten metaal volledig is gestold, kan de verdere ontwijking van waterstof nog slechts tot stand komen via het tweede proces: diffusie van waterstofatomen door het metaal en daarop volgende recombinatie aan het oppervlak tot moleculen. Het diffusieproces vergt meer tijd naarmate de dikte van het metaal, waaruit het gas moet ontwijken, groter en naarmate de temperatuur lager is [3]). Heeft het gelaste metaal een grote dikte, dan blijft er derhalve door twee oorzaken veel waterstof in achter, in de eerste plaats door de grote lengte van de diffusiewegen en in de tweede plaats door de snelle afkoeling die het gevolg is van de grote materiaaldikte. Evenals bij het eerste proces kan ook hier de aanwezigheid van zwavel het ontwijken van de waterstof nog meer vertragen [4]).

De overtollige waterstof, die na de afkoeling in het metaal is achtergebleven, kan zich in moleculaire vorm in inwendige microscopische of submicroscopische holten onder zeer hoge drukken verzamelen. Dit is als volgt te begrijpen [4]). Onderstel eens dat vast ijzer, dat bij 1520 °C in evenwicht is met waterstof van 1 atmosfeer, zo snel tot kamertemperatuur wordt afgekoeld dat alle opgeloste waterstof er nog in aanwezig is. Bij 1520 °C was, zoals uit de oplosbaarheidskromme volgt, ongeveer 14 cm³ waterstof per 100 gram ijzer in atomaire vorm in het ijzer opgelost. Bij kamertemperatuur is in de evenwichtstoestand (met waterstof van 1 atm buiten het ijzer) minder dan 0,1 cm³ waterstof in deze vorm per 100 gram ijzer aanwezig. Na het afschrikken bevindt zich echter nog steeds 14 cm³ waterstof in het ijzer, hetgeen zou corresponderen met een uitwendige evenwichtsdruk van meer dan 20 000 atmosfeer.

De diffusiesnelheid van waterstof in ijzer is bij kamertemperatuur nog betrekkelijk groot, zodat na het afschrikken een belangrijk gedeelte van de waterstof het metaal alsnog na recombinatie op het buitenoppervlak zal verlaten [5]). Maar ook aan elk oppervlak van een kleine holte of van een ingesloten stukje slak in het inwendige van het metaal zal zich hetzelfde proces van de vorming van moleculaire waterstof afspelen. En wat het belangrijke is: dit proces verloopt bij lage temperaturen niet met merkbare snelheid in omgekeerde richting, daar de diffusie in het metaal slechts in atomaire vorm kan plaatsvinden, en de dissociatie van de waterstofmoleculen aan oppervlakken bij lage temperaturen een zeer langzaam verlopend proces is. Zolang er een overmaat waterstof in het metaal is, gaat de diffusie naar de holten dus steeds door, ook al stijgt de druk in de holten tot zeer grote waarden. Deze druk kan in het beschouwde geval tot duizenden atmosferen oplopen!

Bij het lassen met de normale types electrodes kunnen we dus verwachten in kleine holten binnen de las waterstofgas onder zeer hoge druk aan te treffen. Als gevolg hiervan vertonen trekstaven die uit het metaal van zo'n las zijn gemaakt, vaak zg. visogen of „witte vlekken" op hun breukvlak (*fig. 1*). Deze ronde vlekken hebben een klein gaatje of insluitseltje in het midden. Het zijn plaatsen waar het metaal onder invloed van de hoge waterstofdruk en de tijdens het trekken optredende spanningstoestand niet normaal kon vloeien. Binnenin het plastisch vloeiende materiaal deed zich daardoor plaatselijk op zeer verkleinde schaal het verschijnsel van brosse breuk voor. Gebleken is dat de druk in de microholten pas tijdens het trekken tot gevaarlijk grote waarden oploopt. Met andere woorden: visogen ontstaan pas na veel grotere deformaties dan in een constructie ooit optreden, en kunnen dus de sterkte van een lasverbinding in een constructie niet nadelig beïnvloeden.

Ernstiger is, dat de aanwezigheid van veel waterstof onder zeer ongunstige omstandigheden soms tot het optreden van scheuren in of naast de las kan leiden. Het laatste kan zich voordoen bij het electrisch lassen van bepaalde staalsoorten met een zeer hoog koolstofgehalte. Het ontstaan van scheuren naast de las kan hier als volgt verklaard worden. In de omgeving van de las, waar het materiaal tijdens het lassen tot in het austenietgebied (γ-ijzergebied) is verhit,

[2]) J. D. Fast, Oorzaken van porositeit in lasnaden, Philips techn. T. **11**, 101-110, 1949.

[3]) Dit geldt voor ijzer in één bepaalde modificatie, bijv. ferriet; de diffusiesnelheid van waterstof in austeniet is namelijk kleiner.

[4]) J. D. Fast, Waterstof bij het booglassen, Lastechniek **15**, 220-224, 1949.

[5]) Legt men een pas gemaakte las onder water, dan ziet men in vele gevallen gedurende lange tijd kleine gasbellen aan het oppervlak ontstaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kan door de snelle afkoeling een overgang van austeniet in martensiet (koolstofhoudend midbloks kubisch ijzer dat tetragonaal vervormd is) tot stand komen [6]). Dit gaat gepaard met grote

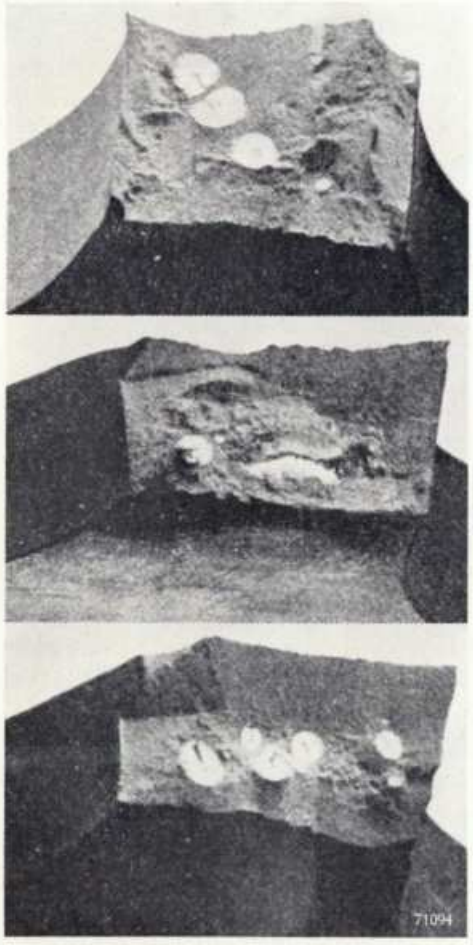

Fig. 1. Visogen op het breukvlak van een trekstaaf uit lasmetaal, veroorzaakt doordat het metaal *a*) gasblaasjes, *b*) grove insluitsels van slak, en *c*) zeer fijne slak-insluitseltjes bevatte.

volumeveranderingen, die op hun beurt scheurtjes van microscopische afmetingen kunnen doen ontstaan. In deze scheurtjes treden dan bij gebruik van niet-waterstofarme beklede electrodes weer zeer hoge waterstofdrukken op, waardoor zij kunnen uitgroeien tot macroscopische scheuren in de betrekkelijk brosse omgeving van de las.

Waterstof kan ook een rol spelen bij het optreden van scheuren in het nog warme metaal van de afkoelende las zelf (zg. „warm-scheuren") [7]). Het zou ons in dit bestek te ver voeren hier dieper op in te gaan.

Bekleding van enkele types lasstaven

Uit het voorgaande volgt, dat het watergehalte van de bekleding een belangrijk kwaliteitskenmerk van een lasstaaf is, en wel een kenmerk waarvan het belang is toegenomen met de daling van de hoeveelheid zuurstof die door de bekleding aan het metaal wordt overgedragen. Wij zullen hierop iets uitvoeriger ingaan door de voornaamste types lasstaven in ogenschouw te nemen. Dit zijn achtereenvolgens :

De onbeklede electrode.

De „dead-soft"-electrode (geheel anorganische bekleding, in hoofdzaak bestaande uit ijzeroxydes, carbonaten en silicaten).

De „ferrimantel"-electrode, met ferromangaan en ferrosilicium aan de bekleding toegevoegd.

De „gasmantel"-electrode, die o.a. grote hoeveelheden rutiel (TiO_2) in de bekleding bevat en voorts als meest karakteristieke bestanddelen bepaalde organische verbindingen.

De „basische" of „waterstofarme" electrode, op de aard waarvan we straks nader zullen ingaan.

De eerstgenoemde twee types lasstaven (onbekleed en „dead-soft") worden tegenwoordig bijna niet meer toegepast. Op het laatste type (de waterstofarme electrode) na, bevatten alle beklede lasstaven stoffen — bijv. waterglas en organische verbindingen — die bij verhitting betrekkelijk veel waterdamp produceren. Uitgaande van de evenwichtsformule (2) zullen wij trachten het waterstofgehalte van het door de verschillende lasstaven neergesmolten metaal te berekenen. Allereerst dienen wij dan de waarde van de grootheid $C(T)$ uit formule (2) bij ca. 1540 °C te kennen, dwz. bij een temperatuur die vlak boven het smeltpunt van ijzer (1539 °C) ligt. Zoals wij elders hebben aangetoond [8]), geldt bij deze temperatuur:

$$C = 1{,}1 \cdot 10^{-6},$$

indien de waterdampdruk in atmosferen wordt opgegeven, en indien voor de percentages opgeloste waterstof en zuurstof gewichtsprocenten worden ingevuld. Verder moeten wij voor elk type lasstaaf over twee experimentele waarden beschikken, nl. over die van het waterdampgehalte van de boogatmosfeer en over die van het zuurstofgehalte van het vloeibare metaal.

Wat dit laatste betreft, doet zich een moeilijkheid voor, doordat het lasmetaal ook silicium en

[6]) Voor een bespreking van de rangschikking van de atomen in de verschillende modificaties van ijzer verwijzen wij bijv. naar: J. D. Fast, Verouderingsverschijnselen in ijzer en staal na snel koelen, Philips techn. T. **13**, 165-172, 1951 (No. 6).

[7]) P. C. van der Willigen, Lastechniek **15**, 317-321, 1949; Berg- und Hüttenmännische Monatshefte **95**, 234, 1950.

[8]) J. D. Fast, Philips Research Reports **5**, 37-45, 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mangaan bevat, die een grote affiniteit tot zuurstof bezitten en de activiteit van dit element in het gesmolten metaal verlagen. We zullen een bovenste grens voor het uiteindelijk gezochte waterstofgehalte verkrijgen indien we alléén rekening houden met dat percentage zuurstof dat bij chemische analyse van het lasmetaal in de vorm van FeO wordt gevonden. Daarentegen mogen we verwachten een onderste grens te verkrijgen indien voor het zuurstofpercentage in formule (2) het totale analytisch bepaalde gehalte wordt ingevuld. Dit ingevulde percentage mag overigens nooit groter zijn dan het verzadigingsgehalte van het neergesmolten metaal bij 1540 °C, dit is 0,2% O. Ook al is in werkelijkheid meer zuurstof opgenomen, dan mogen wij toch niet meer invullen, daar de meerdere hoeveelheid dan niet in opgeloste toestand aanwezig is en de grootheid [% O] in de formule alleen op deze toestand betrekking heeft. Bij het lassen met onbeklede electrodes neemt het metaal inderdaad meer zuurstof op dan met de oplosbaarheid in gesmolten ijzer correspondeert (de rest in de vorm van oxyde). Bij beklede staven streeft men er naar, zoals we gezien hebben, het zuurstofgehalte zo laag mogelijk te maken.

Voor de partiële waterdampdruk in de boogatmosfeer hebben wij, op grond van de experimenten van Mallett en Rieppel [9]), voor alle beklede electrodes behalve de waterstofarme, 0,2 atm ingevuld. Bij de onbeklede electrodes is het waterdampgehalte hoogstens gelijk aan dat van de lucht, dwz. slechts ongeveer 0,01 atmosfeer. Voor de waterstofarme electrodes is in formule (2) dezelfde lage partiële druk ingevuld. Wij komen hierop nog terug.

In de nu volgende *tabel* wordt voor het neergesmolten metaal van de genoemde types lasstaven zowel het totale percentage zuurstof als de fractie die (als FeO) aan ijzer gebonden is, vermeld. Als derde experimenteel bepaald gehalte wordt ook het waterstofgehalte van het neergesmolten metaal gegeven. Daarnaast vindt men in de tabel de op grond van formule (2) berekende onderste grens van het waterstofgehalte (zie hierboven).

Gehalten van neergesmolten metaal aan waterstof en zuurstof.

Type electrode	Experimenteel bepaalde gehalten				Volgens formule (2) berekende onderste grens van het waterstofgehalte
	gew % O totaal	gew % O als FeO	gew % H	gew % H	cm^3 H_2 per 100 g ijzer
onbekleed	0,25	0,25	—	0,0002	2,5
„dead-soft"	0,20	0,20	—	0,0010	11,5
„ferrimantel"	0,12	0,04	0,0015	0,0013[5]	15
„gasmantel"	0,06	0,004	0,0020	0,0019	21
„waterstofarm"	0,03	0,001	0,0007	0,0006	6,5

[9]) M. W. Mallett, Welding J. **25**, 396S-399S, 1946; M. W. Mallett en L. J. Rieppel, Welding J. **25**, 748S-759S, 1946.

Worden op de aangegeven wijze ook bovenste grenzen van de waterstofgehalten berekend, dan worden voor de laatste twee types lasstaven waarden gevonden die met waterstofdrukken aanzienlijk hoger dan 1 atm corresponderen. De berekening van de bovenste grens zou daarom in die gevallen op een iets andere wijze moeten geschieden. Wij gaan daar echter niet verder op in.

Merkwaardigerwijze zien we dat de berekende onderste grenzen van het waterstofgehalte slechts weinig afwijken van de experimenteel bepaalde waarden. Deze overeenstemming is, gezien de onnauwkeurigheid van onze berekeningen, verrassend. Reeds de veronderstelling waarvan wij zijn uitgegaan, nl. dat zich een evenwicht heeft ingesteld, is immers slechts in ruwe benadering geldig. Nog afgescheiden hiervan heffen blijkbaar enkele andere fouten in de berekening elkaar nagenoeg op. Beperken we ons tot de twee belangrijkste verwaarlozingen bij de berekening, dan kunnen we ook zeggen dat de niet in rekening gebrachte hoeveelheid waterstof die tijdens het stollen en afkoelen ontsnapt, blijkbaar ongeveer overeenstemt met de eveneens verwaarloosde hoeveelheid waterstof die op grond van de werking van silicium en mangaan nog extra boven de in de tabel berekende hoeveelheid wordt opgenomen. Inderdaad worden bij extreem snelle afkoeling van een las hogere gehalten aan waterstof gevonden dan de in de tabel vermelde, terwijl bij een abnormaal langzame afkoeling kleinere hoeveelheden waterstof blijken achter te blijven.

De tabel demonstreert wel zeer duidelijk dat de verbetering van de kwaliteit van het lasmetaal door de verlaging van het zuurstofgehalte aanvankelijk gekocht is ten koste van een verhoging van het waterstofgehalte. De nadelen verbonden aan een hoog zuurstofgehalte zijn zo groot, dat onbeklede staven, niettegenstaande het zeer lage waterstofgehalte van de ermee gemaakte lassen, in de meeste landen niet meer worden gebruikt en dat „dead-soft"-electrodes nog slechts worden toegepast in die gevallen waarin de mechanische sterkte van ondergeschikt belang is en waarbij slechts op gemakkelijk lassen en een fraai uiterlijk der verkregen rupsen wordt gelet. Alles bij elkaar genomen, vormen de twee volgende types lasstaven,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de ferrimantel-electrode (bijv. de Philips-lasstaven 50 en Contact 20) en de gasmantel-electrode (bijv. de Philips 68 of de Contact 18), een belangrijke verbetering ten opzichte van de twee voorgaande, maar het waterstofgehalte van het neergesmolten metaal heeft (vooral bij de gasmantel-electrode) een bedenkelijke hoogte bereikt.

De basische electrodes, bijv. de Philips-lasstaven 36 en 56, geven een las met zowel zeer weinig zuurstof als zeer weinig waterstof. Het gebruik van deze, kostbaardere staven is daardoor vaak economisch wel verantwoord. Wij zullen in het volgende bespreken op welke wijze de gunstige eigenschappen van deze electrodes zijn verkregen.

De waterstofarme electrode

In principe kan men het zuurstofgehalte van een lasstaaf verminderen door een bekleding te kiezen die een slak levert welke in het geheel geen oxydes, ofwel slechts zeer stabiele oxydes bevat. Vooral ijzeroxydes moeten worden vermeden. Goede resultaten worden verkregen met een mengsel van stabiele oxydes en fluorides, waarvan de mengverhouding zodanig wordt gekozen dat eveneens slechts weinig stikstof aan het metaal wordt afgegeven [10]).

Om het waterstofgehalte van de te maken las zo gering mogelijk te houden, mag tijdens het lassen slechts weinig waterdamp door de bekleding worden ontwikkeld. Op het eerste gezicht lijkt aan deze eis zeer gemakkelijk te kunnen worden voldaan door de lasstaaf vóór het lassen op zulk een hoge temperatuur te verhitten dat alle gebonden water wordt uitgedreven. Een dergelijke thermische behandeling maakt de meeste electrodes echter onbruikbaar, doordat de gasontwikkeling tijdens het lassen dan gering is, en we hebben reeds gezien dat een goede gasontwikkeling van primair belang is. Tevens gaat de mechanische sterkte van de bekleding door een verhitting in de regel zodanig achteruit, dat de lasstaven niet meer getransporteerd kunnen worden.

Men heeft het gestelde doel echter kunnen bereiken door: a) in de bekleding, in zorgvuldig gekozen mengverhoudingen, stoffen te brengen die niet-waterstofhoudende gassen ontwikkelen, en b) door een streng omschreven thermische behandeling der electrodes voor de aflevering. De naam basische electrode heeft betrekking op het feit dat in de bekleding voornamelijk basische oxydes zijn verwerkt.

De aldus vervaardigde en behandelde waterstofarme electrodes geven bij het lassen slechts zeer weinig waterdamp af; de waterdampdruk in de boogatmosfeer is even laag als bij onbeklede staven, nl. ca. 0,01 atm, wat volgens formule (2) tot het in de tabel opgegeven geringe waterstofgehalte van de las van 6,5 cm³ per 100 gram ijzer leidt. De diverse waterstofmoeilijkheden worden bij gebruik van deze lasstaven niet meer ondervonden.

Gebruik van waterstofarme electrodes

In de practijk is gebleken dat voor een groot aantal toepassingen waarbij normaal, niet gelegeerd, staal moet worden gelast, de niet-basische electrodes in het geheel geen waterstofmoeilijkheden geven. Het gebruik van de besproken waterstofarme electrodes is echter van voordeel zodra zich omstandigheden voordoen waaronder de waterstof moeilijk uit het metaal kan ontwijken. We hebben reeds aangestipt dat dit o.a. het geval is als het staal een meer dan normale hoeveelheid zwavel bevat, en ook als de materiaaldikte betrekkelijk groot is (hoewel men in het laatste geval soms door voorverwarmen van het metaal gevaarlijk grote waterstofconcentraties tijdens het lassen met de niet-basische staven kan vermijden).

De goede eigenschappen van de waterstofarme electrodes kunnen gedeeltelijk verloren gaan indien zij op een ondeskundige wijze worden bewaard en daardoor waterdamp uit de atmosfeer opnemen. Door Zoethout [11]) zijn drie eenvoudige methodes beproefd om een voldoend droge atmosfeer in een opslagplaats voor waterstofarme electrodes te waarborgen:

1) De temperatuur in de opslagplaats wordt voortdurend minstens 10 °C hoger gehouden dan de buitentemperatuur.
2) In de opslagplaats worden bakken met hygroscopische stoffen geplaatst.
3) In de opslagplaats wordt voortdurend gedroogde en verwarmde lucht naar binnen gevoerd.

In de practijk is gebleken dat elk van deze methodes van bewaren voldoende is.

Bij constructies in de open lucht zal een opslagplaats die aan een der drie bovenstaande eisen voldoet, meestal niet ter beschikking staan. Bij de uitvoering van een zeer groot project in ons land, waarvan *fig. 2* een afbeelding geeft, werd als volgt te werk gegaan. De waterstofarme electrodes werden door de Philips-lasstavenfabriek in dozen naar het, niet verwarmde, magazijn gezonden, alwaar de dozen onmiddellijk in blikken bussen werden ge-

[10]) Vgl. hiervoor J. D. Fast, Philips techn. T. **10**, 118-126, 1948.

[11]) G. Zoethout, Lastechniek **17**, 126-128, 1951.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

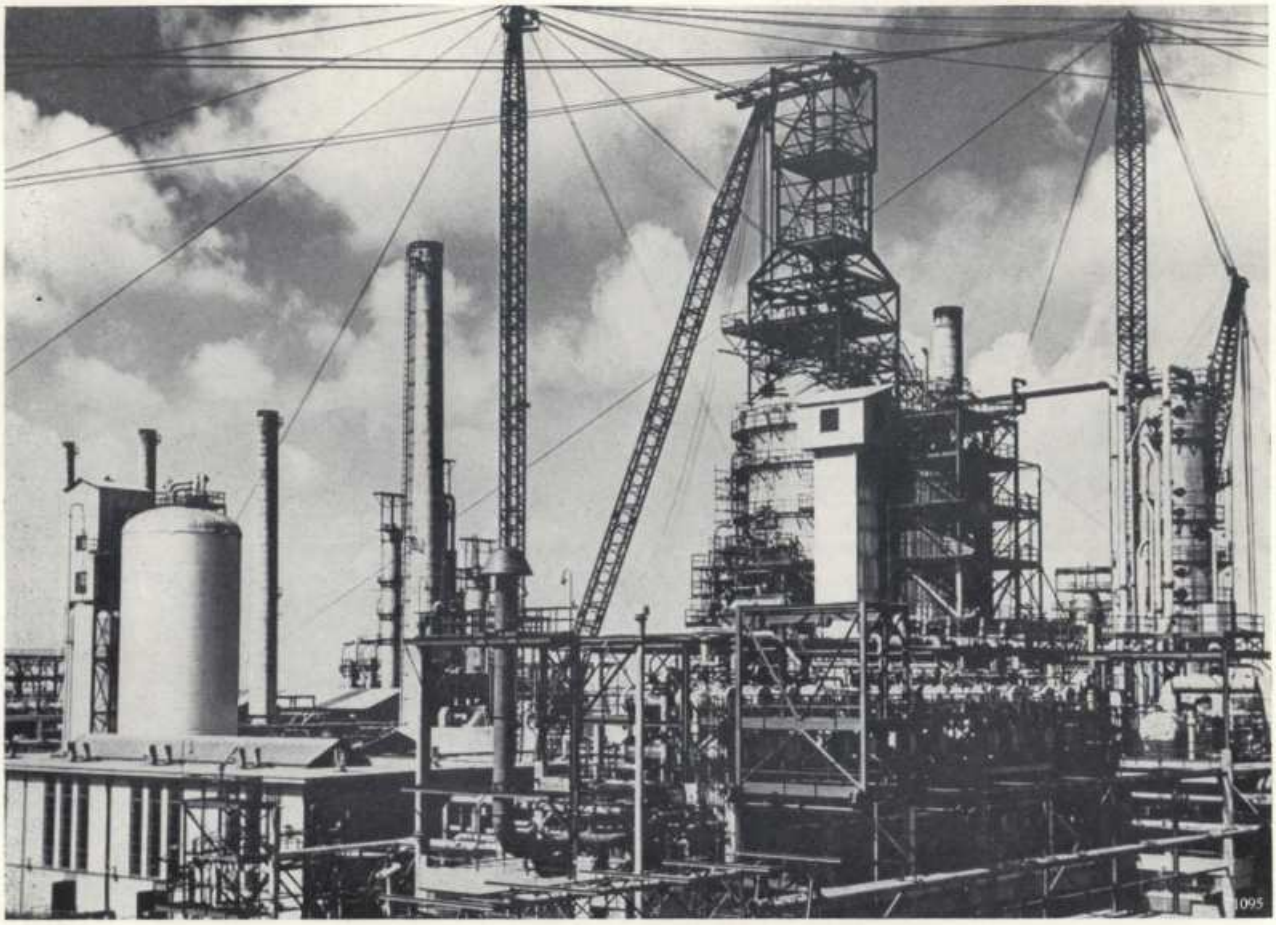

Fig. 2. Een groot lasproject in de open lucht, de katalytische kraakinstallatie van de Bataafsche Petroleum Maatschappij te Pernis. Deze installatie, met een capaciteit van 3500 ton benzine met hoog octaangehalte per dag, is geheel gelast met waterstofarme lasstaven type Philips 36. Het totale aantal verlaste staven bedraagt ca. vier millioen.

plaatst. Deze bussen werden met plakband afgesloten. In deze verpakking bleken de lasstaven zonder enige achteruitgang in kwaliteit te kunnen worden bewaard. Natuurlijk kon niet worden vermeden dat de electrodes van een aangebroken doos gedurende verscheidene uren van de dag met de buitenlucht in aanraking waren. Zelfs bij zware mist bleek echter gedurende die tijd nog niet zoveel vocht door de staven te worden opgenomen dat er waterstofmoeilijkheden bij het lassen optraden.

Samenvatting. Bij het electrisch booglassen worden tegenwoordig nagenoeg uitsluitend beklede lasstaven gebruikt. De bekleding moet aan de voorwaarde voldoen dat zij tijdens het lassen weinig zuurstof (en stikstof) aan het metaal afgeeft, daar anders de las slechte mechanische eigenschappen zou verkrijgen. Bij niet-basische types lasstaven had het onderdrukken van de zuurstofafgifte tot gevolg dat het metaal van de las grote hoeveelheden waterstof opnam. Dit kan bij lassen onder zeer ongunstige omstandigheden tot porositeit van de lasnaad, en het ontstaan van scheuren in en naast de las leiden. Om het waterstofgehalte te verminderen, dient de lasstaaf weinig gebonden water te bevatten. Deze eis heeft geleid tot de ontwikkeling van „basische" of „waterstofarme" electrodes. Zullen deze lasstaven inderdaad in de practijk hun gunstige eigenschappen wat betreft de geringe waterstofafgifte ten volle kunnen behouden, dan moeten zij op speciale wijze worden bewaard.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voorzover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

1981: P. C. van der Willigen: Grepen uit de ontwikkeling van het booglassen (Electrotechniek **29**, 143-147, 1951, No. 8).

Overzicht van diverse questies die van belang zijn bij het booglassen met de hand, zoals de keuze tussen gelijk- en wisselstroom, de open spanning van de lastransformator, enz. Verder worden de diverse lasmethodes vergeleken met betrekking tot de bescherming van het lasmetaal tegen opnemen van stikstof en zuurstof uit de lucht. Het gebruik van waterstof als beschermende atmosfeer en de invloed daarvan op de las worden besproken.

1982: N. Warmoltz: On the application of a Philips ionization gauge type of ion source in a mass spectrometer leak detector (Appl. sci. Res. **B2**, 61-65, 1951, No. 1).

Een electrodenopstelling als in de Philips ionisatiemanometer kan als ionenbron dienen en levert dan een divergerende ionenbundel van niet-homogene snelheid. Laat men deze bundel door een spleet treden, dan kan men alle ionen van dezelfde massa in een tweede, daaraan evenwijdige spleet focusseren door een geschikte combinatie van een magnetisch veld, evenwijdig aan de spleten, en een electrisch veld, loodrecht op de spleten en op de verbindingslijn van de spleten. Tussen beide spleten beschrijven de ionen epicycloïde-achtige banen. Op deze wijze kan een eenvoudige lekkenzoeker worden geconstrueerd.

1983: C. J. Bouwkamp en H. Bremmer: A note on Kline's Bessel-function expansion (Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam **A54**, 130-134, 1951, No. 2).

Een bepaalde combinatie van Bessel-functies, nl. $J_\nu(\nu\sec\vartheta)Y(z+\nu\sec\vartheta)-Y_\nu(\nu\sec\vartheta)J_\nu(z+\nu\sec\vartheta)$ waarin ν, ϑ en z complexe getallen zijn, wordt ontwikkeld in een machtreeks van de variabele $1/\nu$. Deze reeks convergeert als $|\nu|>|z\cos\vartheta|$. De eerste drie coëfficienten worden expliciet vermeld.

1984*: J. H. van Santen en G. H. Jonker: Combinaisons ferromagnétiques du manganèse à structure pérovskite (J. Phys. Radium, **12**, 202-204, 1951, No. 3).

Een studie van het magnetisch gedrag van ferromagnetische mengkristallen met perovskietstructuur, met de samenstelling $(1-x)LaMn^{III}O_3 \cdot xMe\,Mn^{IV}O_3$ (Me = Ca, Sr of Ba) maakt waarschijnlijk dat de (indirecte) plaatsruilwisselwerking tussen Mn^{IV} en Mn^{IV} negatief en die tussen Mn^{III} en Mn^{IV} positief is. Dit laatste geval is het eerste voorbeeld van een positieve indirecte plaatsruilwisselwerking bij oxydische verbindingen.

1985: J. J. Went: Linear magnetisation of homogeneous nickel alloys (Physica **17**, 78-116, 1951, No. 2).

Onderzoek betreffende de magnetostrictie van homogene nikkellegeringen als functie van de samenstelling, van de inductie veroorzaakt door een veld, en van de temperatuur. De resultaten zijn in een tabel samengevat. Voor binaire mengsels worden een aantal algemeen geldige betrekkingen gevonden. De verzadigingsmagnetostrictie λ_s bij het absolute nulpunt kan worden voorspeld als de verzadigingsinductie I_s bekend is; bij hogere temperaturen volgt λ_s direct uit de waarde bij 0 °K en het verband tussen I_s en de temperatuur T (behalve voor Ni-Mn legeringen). Een direct verband tussen λ en I is gevonden voor alle legeringen behalve die welke cobalt of mangaan bevatten. Uit deze gegevens kan de magnetostrictie van ternaire legeringen berekend worden.

1986: G. W. Rathenau en G. Baas: Grain growth in a texture, studied by means of electron-emission microscopy (Physica **17**, 117-128, 1951, No. 2).

Kristalgroei en secundaire rekristallisatie in gewalste midzijds kubische nikkelijzerlegeringen zijn bestudeerd volgens een electronenmicroscopische methode, waarbij het geactiveerde oppervlak van het metaal bij hoge temperatuur tot circa 500× vergroot kan worden afgebeeld. De kristalgroei in een onvolmaakte kubische textuur bleek een discontinu proces te zijn. Bijna alle naburige kristallen dringen snel een bepaald kristal of groep van kristallen binnen. Op kleine schaal heeft beweging van kristalgrenzen plaats indien de oppervlakte-energie aan de grens klein is. De energierijke delen der kristalgrenzen tussen een kubisch kristal en zijn naastbijzijnde tweeling bleken te bewegen in een richting evenwijdig aan het gemeenschappelijke (111)-vlak. De oppervlaktespanning van de grens tussen een secundair kristal en een kubisch kristal dat voorbestemd is om te worden opgeslokt is ongeveer tweemaal zo groot als de waarde die betrekking heeft op de grens tussen twee kubische kristallen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!